

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
зі спеціальності
174 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

тема роботи:

«Розробка системи автоматичного керування гідропонною фермою в закритому просторі»

Виконав студент гр. АКІТР-23ск _____ Капітон Д. В.

Керівник _____ Курганов І. Д.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 28 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Капітону Денису Валентиновичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Розробка системи автоматичного керування гідропонною фермою в закритому просторі»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка, презентація у Microsoft PowerPoint в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

Курганов І.Д.

Нормоконтроль

Маринич І. А.

5. «Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>05.04.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>18.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>02.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>23.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.24</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>10.06.24</i>

6. Дата видачі завдання: 30.03.2026р.

Керівник _____ / Курганов І.Д./

7. Запевнення: Я, Капітон Денис Валентинович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомена.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Капітон Д. В./

АНОТАЦІЯ

Капітон Д. В. «Розробка системи автоматичного керування гідропонною фермою в закритому просторі».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти – бакалавр, за спеціальністю 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2026.

Робота складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку літератури з 30 та 6 додатків. Загальний обсяг роботи становить 97 сторінок, з яких основний зміст роботи викладено на 74 сторінках, робота включає 6 таблиць і 17 рисунків.

У роботі розроблено систему автоматичного керування гідропонною фермою на основі інтеграції середовищ MATLAB Simulink та Node-RED. Запропоновано багатоканальну структуру керування, що включає контур клімату (температура, вологість, концентрація CO₂, освітленість) та контур живлення (рН і електропровідність).

Математичну модель об'єкта реалізовано у Simulink у вигляді системи з розподіленими параметрами, що відображає інерційні та інтегруючі властивості гідропонного середовища. Алгоритми керування реалізовано у Node-RED у вигляді потокової структури з використанням логіки порогового регулювання. Інтеграцію між компонентами здійснено за допомогою протоколу MQTT. Розроблено автоматизований MATLAB-скрипт для проведення моделювання. Отримана система реалізує концепцію цифрового двійника гідропонної ферми.

ГІДРОПОНІКА, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, SIMULINK, NODE-RED, MQTT, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, БАГАТОКАНАЛЬНА СИСТЕМА.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	АНОТАЦІЯ			
зроб.		Капітон Д.В						
Перевір.		Курганов І.Д.						
Н. Контр.		Маринич І.А.						
Затвердив		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск			

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГІДРОПОНІКИ	9
1.1 Особливості гідропонної ферми як об’єкта автоматичного керуван...	9
1.2 Параметри, що підлягають автоматичному контролю	12
1.3 Виконавчі механізми та параметри управління	15
1.4 Огляд існуючих систем автоматизації гідропонних ферм.....	16
1.5 Постановка задачі дослідження та формування вимог до системи автоматичного керування	18
Висновки до розділу:	21
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА САК ГІДРОПОННИМ ПРОЦЕСОМ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ NODE-RED З ІНТЕГРАЦІЄЙ MATLAB SIMULINK	22
2.1 Розробка математичної моделі системи управління	22
2.1.1 Обґрунтування архітектури системи за трирівневою моделлю	22
2.1.2 Формування структурної схеми системи керування.....	24
2.1.3 Обґрунтування контурів автоматичного керування.....	27
2.1.4 Математична модель кліматичного контуру	31
2.1.4.1 Побудова та обґрунтування математичної моделі	31
Кліматичний контур гідропонної ферми формує повітряне середовище ...	31
2.1.4.2 Модель контуру живлення (pH та EC).....	33
2.2 Розробка Simulink-моделі двоконтурної системи керування гідропонною фермою	36
2.2.1 Мета, задачі дослідження та умови моделювання	36

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>ЗМІСТ</i>		
Розроб.		Капітон Д.В.					
Перевір.		Курганов І.Д.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затвердив		Маринич І.А.			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

2.2.2	Принцип дії системи та алгоритм побудови Simulink-моделі.....	37
2.2.3	Структурна схема Simulink-моделі двоконтурної системи керування.	38
2.2.4	Реалізація моделі в Simulink	40
2.2.5	Урахування збурень та міжконтурних зв'язків у моделі системи керування.....	47
2.2.6	Математичне моделювання та аналіз фізіологічних процесів у гідропонній системі.....	54
2.2.7	Порівняльний аналіз режимів моделювання.....	60
2.3	Реалізація алгоритму керування у середовищі Node-RED та інтеграція з MATLAB Simulink	60
2.3.1	Загальна концепція інтеграції.....	60
2.3.2	Структура потокової моделі Node-RED	62
	<i>Висновки до розділу:</i>	68
	ВИСНОВКИ	70
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
	ДОДАТОК А Перехідні процеси двоконтурної системи керування без урахування збурень та міжконтурних зв'язків.....	74
	ДОДАТОК Б Перехідні процеси двоконтурної системи керування без урахування збурень та міжконтурних зв'язків.....	77
	ДОДАТОК В Перехідні процеси двоконтурної системи керування з урахування збурень та міжконтурних зв'язків.....	80
	ДОДАТОК Г Перехідні процеси двоконтурної системи керування з моделювання автоматичної системи гідропоніки з урахуванням зовнішніх збурень, перехресних зв'язків між контурами клімату та живлення та біологічних процесів контурів Plant Activity	84
	ДОДАТОК Д Скрипт JSON FLOW	87
	ДОДАТОК Є MATLAB-скрипт, який створює модель Simulink, забезпечує MQTT-взаємодію.....	92

ВСТУП

Сучасний розвиток агротехнологій характеризується активним впровадженням автоматизованих систем керування процесами вирощування рослин у контрольованих середовищах. Одним із найбільш перспективних напрямків є гідропонне вирощування у закритих приміщеннях, яке дозволяє забезпечити стабільну врожайність незалежно від кліматичних умов, мінімізувати використання водних ресурсів та оптимізувати споживання добрив.

Ефективність функціонування гідропонних ферм безпосередньо залежить від точності підтримання параметрів мікроклімату та складу живильного розчину. Відхилення температури, концентрації поживних речовин або інших параметрів можуть призводити до зниження швидкості росту рослин або втрати врожаю.

Застосування систем автоматичного керування дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу, підвищити енергоефективність та зменшити вплив людського фактору. Особливої актуальності набуває використання математичного моделювання для дослідження динаміки систем керування ще на етапі проектування.

У зв'язку з цим розробка та дослідження моделі автоматизованої системи керування гідропонною фермою є актуальним інженерним завданням.

Метою роботи є розробка та дослідження моделі системи автоматичного керування гідропонною фермою в закритому середовищі з використанням двоконтурної структури регулювання кліматичних параметрів та складу живильного розчину.

Об'єктом дослідження є процес підтримання параметрів мікроклімату та складу живильного розчину у гідропонній системі.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП				Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Капітон Д.В.									
Перевір.		Курганов І.Д.									
Н. Контр.		Маринич І.А.							КНУ АКІТР-23ск		
Затвердив		Маринич І.А.									

Предметом дослідження є система автоматичного керування зазначеними параметрами на основі двоконтурної структури.

Задачею роботи є розробка моделі системи автоматичного керування та дослідження її динамічних характеристик шляхом імітаційного моделювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз особливостей гідропонних систем як об'єктів автоматичного керування;
- визначити основні технологічні параметри, що підлягають регулюванню;
- сформулювати структуру двоконтурної системи керування;
- розробити математичні моделі кліматичного контуру та контуру живлення;
- реалізувати модель системи в середовищі MATLAB Simulink;
- здійснити моделювання перехідних процесів;
- виконати налаштування та оптимізацію PID-регуляторів;
- оцінити якість функціонування системи керування;
- обрати відповідні інструменти та розробити програмне забезпечення для контролю та керування.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГІДРОПОНІКИ

1.1 Особливості гідропонної ферми як об'єкта автоматичного керування

Гідропонна ферма в закритому середовищі є складним багатопараметричним технологічним об'єктом керування, в якому процес росту рослин повністю залежить від штучно створених умов середовища. На відміну від традиційного ґрунтового землеробства, де значна частина параметрів визначається природними факторами, у гідропонних системах всі життєво важливі змінні підлягають технічному регулюванню [3], [11].

Основними керованими параметрами такого об'єкта є:

- температура повітря;
- відносна вологість;
- концентрація CO₂;
- інтенсивність освітлення;
- температура живильного розчину;
- рівень рН;
- електропровідність (ЕС);
- рівень розчину;
- швидкість циркуляції.

Ці параметри безпосередньо впливають на швидкість фотосинтезу, транспірацію, засвоєння макро- та мікроелементів, а також на загальну продуктивність культури [5], [14].

Таким чином, гідропонна ферма виступає як багатовимірний об'єкт керування з взаємопов'язаними каналами впливу.

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗДІЛ 1			
Розроб.		Капітон Д.В.						
Перевір.		Курганов І.Д.						
Н. Контр.		Маринич І.А.						
Затвердив		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск			

Динамічні властивості об'єкта. Особливістю гідропонної системи є наявність повільних біологічних процесів у поєднанні з відносно швидкими фізичними процесами.

Наприклад:

- зміна температури повітря відбувається протягом хвилин;
- стабілізація вологості — десятки хвилин;
- зміна концентрації поживних речовин — години;
- реакція рослин на зміну середовища — доби.
- Це створює ієрархічну структуру інерційності системи [8].
- З точки зору теорії автоматичного керування, об'єкт має:
- значні запізнення;
- нелінійні характеристики;
- міжканальні зв'язки;
- змінні параметри у часі.

Наприклад, підвищення температури повітря знижує відносну вологість, що змінює транспірацію рослин і впливає на споживання води. У свою чергу, це змінює концентрацію розчину в кореневій зоні [9].

Нелінійність об'єкта. Гідропонна ферма є суттєво нелінійною системою. Залежність швидкості росту рослин від температури, освітлення чи концентрації солей має екстремальний характер.

Наприклад:

- при низьких значеннях ЕС спостерігається дефіцит живлення;
- при високих — пригнічення росту через осмотичний стрес.

Аналогічно, ефективність фотосинтезу нелінійно залежить від освітлення [12].

Це означає, що об'єкт не може бути адекватно описаний простою лінійною моделлю в широкому діапазоні режимів роботи.

Наявність збурень

На систему постійно діють зовнішні та внутрішні збурення:

- відкривання технологічних дверей;

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- коливання зовнішньої температури;
- зміна біомаси рослин;
- випаровування води;
- нерівномірність освітлення.

Особливо важливим є біологічний фактор - рослини змінюють власні властивості в процесі росту, що призводить до зміни параметрів об'єкта керування [6].

Таким чином, система є нестационарною.

Багатоконтурність

Функціонально об'єкт доцільно розділити на два основні підконтури:

1. Кліматичний контур:

- температура;
- вологість;
- CO₂;
- вентиляція;
- освітлення.

2. Контур живлення:

- рН;
- ЕС;
- рівень розчину;
- температура розчину;
- дозування компонентів.

Ці підсистеми взаємопов'язані. Наприклад, підвищення температури повітря збільшує споживання води, що змінює концентрацію солей [10].

Отже, об'єкт є багатоканальним із перехресними зв'язками.

Інерційність і запізнення. Система характеризується:

- тепловою інерцією повітря;
- інерцією масообміну;
- інерцією зміни складу розчину.

Додавання добрив не призводить до миттєвої зміни концентрації — потрібен час на перемішування і циркуляцію [13].

Це робить систему придатною для використання PID-регуляторів, але потребує їх оптимального налаштування.

Вимоги до системи керування. Система автоматизації повинна забезпечувати: стабілізацію параметрів; компенсацію збурень; мінімізацію енергоспоживання; підтримання оптимальних умов росту.

Критеріями якості є:

- мінімальне перерегулювання;
- швидкодія;
- відсутність автоколивань;
- енергоефективність.

Гідропонна ферма в закритому середовищі є складним нелінійним, нестационарним, багатоканальним об'єктом керування з розподіленими параметрами та значними запізненнями. Наявність взаємопов'язаних кліматичних і поживних процесів обумовлює доцільність застосування двоконтурної системи автоматичного керування.

Це визначає необхідність побудови математичної моделі об'єкта та подальшого синтезу системи керування з використанням PID-регуляторів, що і є предметом подальших досліджень у роботі.

1.2 Параметри, що підлягають автоматичному контролю

Ефективне функціонування гідропонної ферми у закритому середовищі можливе лише за умови безперервного автоматичного контролю параметрів, що визначають мікроклімат та стан живильного середовища. На відміну від традиційного землеробства, у гідропонній системі всі життєво важливі фактори підтримуються технічними засобами у вузько визначених межах. Контроль параметрів дозволяє оптимізувати ріст рослин, забезпечити стабільну врожайність та зменшити витрати ресурсів [3], [11].

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Параметри поділяються на дві функціональні групи:

- параметри клімату;
- параметри живильного середовища.

Параметри кліматичного середовища

Температура повітря. Температура впливає на швидкість фотосинтезу, транспірацію, дихання та засвоєння поживних речовин. Підтримка оптимального температурного режиму забезпечує стабільність росту рослин і дозволяє уникнути стресових станів. Надто низька або висока температура може пригнічувати метаболізм, знижувати врожайність і порушувати розвиток рослин [5].

Відносна вологість повітря. Вологість визначає інтенсивність випаровування води рослинами і впливає на водний баланс та споживання розчину. Автоматичне регулювання запобігає пересушуванню кореневої системи, зменшує ризик розвитку грибкових захворювань та підвищує ефективність фотосинтезу [6].

Концентрація CO₂ є основним субстратом фотосинтезу. Контроль концентрації дозволяє збільшити продуктивність, оптимізувати використання освітлення та підвищити швидкість росту рослин. Недостатній CO₂ призводить до уповільнення росту навіть за оптимальної температури та вологості [7].

Освітленість. Інтенсивність та тривалість освітлення визначають швидкість фотосинтезу, формування листя та біомаси. Автоматичний контроль освітлення дозволяє підтримувати оптимальний фотоперіод та адаптувати освітлювальні режими для різних фаз росту, що підвищує продуктивність [12].

Температура живильного розчину. Температура розчину впливає на засвоєння мінеральних речовин, розчинність кисню та стабільність хімічного складу. Контроль температури дозволяє уникнути стресових умов для коренів і забезпечити ефективне живлення рослин [9].

Параметри живильного середовища

Кислотність (pH). Рівень pH визначає доступність макро- та мікроелементів. Підтримання оптимального значення забезпечує ефективне

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

засвоєння поживних речовин і запобігає токсичності чи дефіциту окремих елементів, що безпосередньо впливає на ріст та якість продукції [10].

Електропровідність (ЕС) відображає загальну концентрацію солей у розчині. Контроль ЕС дозволяє уникнути дефіциту або надлишку поживних речовин, забезпечує стабільний водний баланс рослин та оптимальне живлення [21].

Рівень живильного розчину контролює доступність води та поживних речовин для кореневої системи. Його стабілізація запобігає висиханню або переливу, забезпечує рівномірну циркуляцію та стабільність ЕС [21].

Швидкість циркуляції. Циркуляція забезпечує рівномірність складу розчину, насичення киснем та стабільність температури. Контроль швидкості запобігає стратифікації розчину та дозволяє підтримувати оптимальні умови в зоні коренів [9].

Допоміжні параметри. До допоміжних змінних належать: витрати води; дозування добрив; стан насосів та клапанів; енергоспоживання.

Контроль цих змінних дозволяє оцінювати ефективність системи, знижувати витрати ресурсів та попереджати аварійні ситуації.

Взаємозв'язок параметрів. Параметри мікроклімату та живильного середовища мають тісні міжканальні взаємозв'язки. Наприклад, підвищення температури збільшує транспірацію, що впливає на концентрацію солей, а це змінює ЕС та рН. Контроль всіх параметрів одночасно дозволяє стабілізувати середовище для оптимального росту рослин [10], [21].

Автоматичний контроль кліматичних та поживних параметрів є необхідним для забезпечення стабільного росту рослин і високої продуктивності гідропонної ферми. Контроль усіх зазначених параметрів створює підґрунтя для впровадження двоконтурної системи автоматичного керування, де один контур відповідає за клімат, а інший – за живлення рослин.

1.3 Виконавчі механізми та параметри управління

Функціонування системи автоматичного керування гідропонною фермою у закритому середовищі ґрунтується на цілеспрямованій зміні параметрів технологічного процесу за допомогою відповідних виконавчих механізмів. Якщо попередній підрозділ визначає, які саме змінні потребують контролю, то на даному етапі важливо встановити, які фізичні впливи можуть бути реалізовані для їх регулювання та яким чином ці впливи трансформуються у керуючі дії.

Параметри управління у гідропонній системі формуються як результат зміни енергетичних або масообмінних процесів у середовищі вирощування. Регулювання теплового стану здійснюється шляхом зміни теплового потоку, що вводиться у систему або відводиться з неї. Це дозволяє впливати на швидкість біологічних процесів, які залежать від температурного режиму. Вплив на масообмін між рослинами та навколишнім середовищем реалізується через зміну інтенсивності повітряних потоків, що, у свою чергу, визначає швидкість випаровування та стабільність мікроклімату.

Управління газовим складом середовища здійснюється шляхом дозованої подачі відповідних компонентів у повітряний об'єм ферми. Такий вплив спрямований на стабілізацію процесів фотосинтезу, що безпосередньо визначають продуктивність біомаси. Світловий режим формується шляхом регулювання потужності джерел штучного освітлення, що дозволяє змінювати енергетичне навантаження на рослини відповідно до фаз їх розвитку.

Особливу роль у системі управління відіграє регулювання параметрів живильного середовища. Склад розчину змінюється шляхом дозованого введення компонентів, що дозволяє впливати на концентрацію поживних речовин без порушення загального балансу системи. Одночасно здійснюється регулювання об'ємних характеристик середовища, що забезпечує стабільність умов для функціонування кореневої системи. Гідродинамічний стан розчину

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

змінюється шляхом керування швидкістю його переміщення, що дозволяє забезпечити однорідність складу та рівномірність температурного поля.

Таким чином, кожен параметр управління відповідає певному фізичному процесу, який може бути змінений за допомогою технічного впливу. Реалізація цих впливів забезпечується виконавчими механізмами, що перетворюють електричні сигнали системи керування у механічну, теплову або масообмінну дію. Вибір таких механізмів обумовлений необхідністю забезпечення достатньої швидкодії, точності та енергетичної ефективності.

Виконавчі пристрої, що використовуються у гідропонних системах, формують матеріальну основу реалізації керуючих сигналів. Через них система автоматичного керування впливає на параметри мікроклімату та стан живильного середовища, змінюючи інтенсивність теплових, масообмінних і гідродинамічних процесів. Саме ці пристрої забезпечують замикання контурів керування та перетворюють інформаційні сигнали регуляторів у фізичні дії, здатні змінювати стан об'єкта.

Таким чином, параметри управління та виконавчі механізми утворюють взаємопов'язану систему, у якій інформаційний вплив трансформується у технологічний результат. Їх узгоджене функціонування забезпечує можливість реалізації автоматичного регулювання параметрів середовища, що створює необхідні передумови для побудови структурної схеми системи керування, яка буде розглянута у наступному розділі.

1.4 Огляд існуючих систем автоматизації гідропонних ферм

Розвиток автоматизованих систем керування гідропонними фермами є логічним наслідком переходу сучасного агровиробництва до високотехнологічних методів вирощування продукції у контрольованому середовищі. Гідропоніка як безґрунтова технологія дозволяє значно прискорити ріст рослин та підвищити врожайність за рахунок прямого регулювання параметрів живильного середовища і мікроклімату [7]. При цьому традиційне

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ручне керування такими параметрами є неефективним через складну багатофакторну взаємодію фізико-хімічних і біологічних процесів.

У сучасних наукових дослідженнях автоматизація гідропонних установок розглядається як комплексна задача керування середовищем вирощування. Основна увага приділяється створенню систем моніторингу та регулювання температури, вологості, кислотності розчину, концентрації поживних речовин та освітлення [10]. Використання сенсорних мереж та цифрових платформ дозволяє реалізувати безперервний контроль стану рослин і автоматичну корекцію режимів вирощування у реальному часі.

Відомі рішення базуються на принципах інтелектуального керування. Зокрема, у дослідженнях показано ефективність застосування нечіткої логіки для регулювання подачі живильного розчину, що забезпечує оптимальне постачання макро- і мікроелементів залежно від фаз розвитку рослин [12]. Такий підхід дозволяє зменшити перевитрати добрив та підвищити стабільність росту культури.

Подальший розвиток отримали системи, що інтегрують методи машинного навчання у процес керування тепличним середовищем. Встановлено, що адаптивні алгоритми здатні прогнозувати потреби рослин і змінювати режими мікроклімату, зокрема температури та вологості, що прямо впливають на швидкість росту та врожайність [5]. Це дозволяє перейти від реактивного до проактивного керування.

У сучасних автоматизованих фермах широко застосовуються IoT-орієнтовані архітектури, у яких сенсори об'єднані в єдину інформаційну систему. Такі рішення забезпечують дистанційний контроль технологічного процесу та автоматичне регулювання параметрів живлення і освітлення [10]. Дослідження показують, що інтеграція мережевих технологій дозволяє не лише підвищити врожайність, але й зменшити енергоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання.

Окремим напрямом є створення повністю автономних агросистем, у яких управління здійснюється без участі оператора. Прикладом концептуального

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розвитку автоматизованого землеробства є проекти роботизованого виробництва, де весь цикл вирощування виконується автоматично [18]. Хоча такі рішення орієнтовані переважно на польове землеробство, їх принципи активно адаптуються до тепличних і гідропонних систем.

Загалом аналіз сучасних систем автоматизації показує перехід від простих регуляторів до комплексних багатоконтурних систем керування. Основною тенденцією є інтеграція кліматичних та живильних контурів у єдину структуру керування, що дозволяє враховувати взаємний вплив параметрів середовища на фізіологічні процеси рослин.

Таким чином, існуючі наукові та інженерні рішення підтверджують доцільність застосування автоматизованих систем керування у гідропоніці та визначають перспективність використання двоконтурних структур управління, які поєднують регулювання мікроклімату та живильного середовища.

1.5 Постановка задачі дослідження та формування вимог до системи автоматичного керування

Результати проведеного аналізу гідропонної ферми як об'єкта керування та огляду існуючих систем автоматизації дозволяють сформулювати науково-технічну задачу дослідження, що полягає у розробці ефективної структури автоматичного керування технологічними параметрами середовища вирощування рослин у замкненому просторі. Особливістю такого об'єкта є складна взаємодія кліматичних та поживних процесів, які визначають фізіологічний стан рослин та їх продуктивність.

На відміну від традиційних технологічних систем, у гідропонній фермі керування здійснюється не лише технічним об'єктом, але й біологічною системою, параметри якої змінюються у часі. Це обумовлює необхідність формування системи автоматичного керування, здатної підтримувати стабільність середовища при наявності внутрішніх та зовнішніх збурень.

Аналіз функціонування сучасних гідропонних установок показує, що

					КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ефективність вирощування визначається сукупністю взаємопов'язаних факторів, серед яких провідну роль відіграють температурні, масообмінні та концентраційні процеси. Наприклад, зміна температури впливає на інтенсивність транспірації, що, у свою чергу, змінює концентрацію поживних речовин у розчині. Це свідчить про необхідність розгляду гідропонної ферми як багатоканального об'єкта керування.

Таким чином, задача дослідження полягає у створенні такої системи автоматичного керування, яка забезпечить узгоджене регулювання параметрів середовища вирощування з урахуванням їх взаємного впливу. Основною метою є підтримання умов, близьких до оптимальних, що сприятимуть стабільному росту рослин та підвищенню продуктивності системи.

Враховуючи фізичну природу процесів, що протікають у гідропонній фермі, доцільним є поділ системи керування на два функціонально взаємопов'язані контури. Перший контур відповідає за стабілізацію параметрів мікроклімату, які визначають умови існування рослин у повітряному середовищі. Другий контур орієнтований на регулювання характеристик живильного розчину, що забезпечує безпосереднє постачання поживних речовин до кореневої системи.

Формування такої структури дозволяє реалізувати принцип декомпозиції складного об'єкта керування та забезпечити незалежне налаштування регуляторів у кожному контурі. Водночас необхідно враховувати наявність перехресних зв'язків між контурами, що зумовлює необхідність узгодженого функціонування всієї системи.

У процесі формування вимог до системи автоматичного керування необхідно враховувати як технологічні, так і енергетичні аспекти її функціонування. З технологічної точки зору система повинна забезпечувати стабілізацію параметрів середовища у межах допустимих відхилень, що визначаються біологічними потребами рослин. Водночас важливим є забезпечення достатньої швидкодії системи, яка дозволить компенсувати вплив збурень без виникнення значних перехідних процесів.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З позиції теорії автоматичного керування система повинна відповідати вимогам стійкості, точності та адаптивності. Стійкість забезпечує здатність системи повертатися до заданого стану після дії збурень. Точність визначає ступінь відповідності фактичних параметрів середовища заданим значенням. Адаптивність дозволяє враховувати зміну властивостей об'єкта, що обумовлена ростом рослин та зміною їх фізіологічного стану.

Окремим аспектом є енергетична ефективність функціонування системи. Оскільки більшість процесів у гідропонній фермі реалізується за рахунок штучно створених умов, мінімізація енергоспоживання стає важливою вимогою до системи керування. Це досягається шляхом оптимізації режимів роботи виконавчих механізмів та запобігання надлишковим коливанням параметрів.

Узагальнюючи викладене, можна сформулювати основні вимоги до системи автоматичного керування гідропонною фермою. Система повинна забезпечувати стабілізацію параметрів мікроклімату та живильного середовища у заданих межах, компенсувати вплив зовнішніх і внутрішніх збурень, підтримувати стійкість при зміні властивостей об'єкта та забезпечувати енергоефективність технологічного процесу.

Реалізація зазначених вимог можлива шляхом використання регуляторів з безперервною дією, здатних забезпечити необхідну якість перехідних процесів. Застосування класичних методів регулювання дозволяє забезпечити достатню простоту реалізації та надійність функціонування системи.

Таким чином, постановка задачі дослідження зводиться до синтезу двоконтурної системи автоматичного керування гідропонною фермою, яка забезпечить стабілізацію параметрів клімату та живильного середовища, а також до дослідження її динамічних властивостей у процесі моделювання.

Сформульовані вимоги створюють основу для подальшого переходу до побудови математичної моделі об'єкта керування, що є необхідною умовою синтезу системи регулювання та дослідження її перехідних процесів

Висновки до розділу:

У розділі виконано аналіз сучасних систем автоматизації гідропонних ферм, визначено основні параметри керування та особливості технологічного процесу. Розглянуто принципи побудови систем автоматичного керування, засоби автоматизації та обґрунтовано необхідність використання математичного моделювання для дослідження динаміки гідропонного середовища.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.01.ПЗ</i>	Арк.
						21
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА САК ГІДРОПОННИМ ПРОЦЕСОМ, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ У СЕРЕДОВИЩІ NODE-RED З ІНТЕГРАЦІЄЙ MATLAB SIMULINK

2.1 Розробка математичної моделі системи управління

2.1.1 Обґрунтування архітектури системи за трирівневою моделлю

Розробка системи автоматичного керування гідропонною фермою потребує формування узгодженої архітектури, яка забезпечить ефективну взаємодію між процесами вимірювання, регулювання та прийняття рішень. Аналіз сучасних автоматизованих агротехнологічних систем показує, що найбільш доцільною є побудова ієрархічної структури керування, яка дозволяє розподілити функції між рівнями відповідно до їх призначення [10], [12].

У досліджених раніше рішеннях автоматизації гідропонних установок простежується тенденція до використання багаторівневих систем керування, що поєднують локальні контури регулювання з системами моніторингу та оптимізації [5]. Такий підхід дозволяє забезпечити як швидкодію у процесах стабілізації параметрів середовища, так і стратегічне керування режимами вирощування.

У зв'язку з цим доцільно застосувати трирівневу архітектуру системи керування, яка відповідає сучасним принципам побудови автоматизованих технологічних комплексів [7].

На нижньому рівні реалізуються функції первинного контролю та впливу на об'єкт. Саме тут відбувається безпосереднє вимірювання параметрів середовища та формування керуючих дій, що забезпечують стабілізацію технологічного процесу.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Капітон Д.В.			РОЗДІЛ 2	Літ.	Арк.
Перевір.		Курганов І.Д.					Аркушів
Н. Контр.		Маринич І.А.				КНУ АКІТР-23ск	
Затвердив		Маринич І.А.					

Даний рівень характеризується високою швидкістю та працює у режимі реального часу.

Середній рівень виконує функції координації та обробки інформації. Його призначення полягає у формуванні узгоджених режимів роботи окремих контурів керування з урахуванням їх взаємного впливу. Саме на цьому рівні реалізується логіка функціонування системи, що дозволяє інтегрувати кліматичні та поживні процеси у єдину структуру.

Верхній рівень відповідає за стратегічне управління та моніторинг. Він забезпечує накопичення даних, аналіз функціонування системи та корекцію заданих режимів у залежності від умов експлуатації. У сучасних рішеннях цей рівень часто інтегрується з інформаційними системами дистанційного контролю та оптимізації технологічних процесів [10].

Використання такої архітектури дозволяє реалізувати принцип функціональної декомпозиції складного об'єкта керування, що є особливо важливим у випадку гідропонної ферми, де процеси кліматичного регулювання та живлення мають різну динаміку, але залишаються взаємопов'язаними.

Як показано в огляді існуючих систем, інтеграція локальних контурів регулювання з інформаційними рівнями керування дозволяє підвищити стабільність процесу вирощування та зменшити вплив зовнішніх збурень [5], [12]. Саме тому використання трирівневої архітектури є обґрунтованим рішенням для побудови системи автоматичного керування гідропонною фермою.

Застосування такої структури створює основу для подальшого синтезу математичної моделі об'єкта керування та дозволяє розподілити функції регулювання між кліматичним і поживним контурами відповідно до їх динамічних властивостей.

Таким чином, вибір трирівневої архітектури забезпечує: узгодженість процесів керування; масштабованість системи; можливість інтеграції з цифровими технологіями; ефективну реалізацію двоконтурної структури регулювання.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



рівень 3 — SCADA / моніторинг (верхній рівень); рівень 2 — координуючий контролер; рівень 1 — локальні контури керування

Рисунок 2.1 - Структурна схема трирівневої системи керування

Це створює передумови для переходу до математичного опису об'єкта керування.

2.1.2 Формування структурної схеми системи керування

Після обґрунтування доцільності використання трирівневої архітектури виникає необхідність формування структурної схеми системи керування, яка відображає взаємозв'язок між її основними функціональними елементами. Така схема є проміжною ланкою між концептуальним описом системи та її математичною моделлю і дозволяє визначити канали передавання інформації та керуючих впливів.

Гідропонна ферма як об'єкт автоматизації характеризується наявністю двох груп процесів, що мають різну фізичну природу, але спільно визначають умови розвитку рослин. Перша група пов'язана з формуванням повітряного середовища вирощування, друга — зі станом живильного розчину. Враховуючи цю особливість, структурна схема системи керування повинна відобразити поділ на два функціонально пов'язані контури.

Кліматичний контур призначений для регулювання параметрів середовища, що визначають теплові та масообмінні процеси у повітряному просторі ферми. Його функціонування спрямоване на підтримання стабільних умов, необхідних для нормального протікання фотосинтетичних процесів. Зміни стану повітряного середовища відбуваються під впливом керуючих дій, що формуються регулятором на основі інформації про поточні відхилення від заданих значень.

Контур керування живильним середовищем орієнтований на підтримання оптимального складу розчину, який безпосередньо забезпечує рослини необхідними речовинами. Його функціонування пов'язане зі зміною концентраційних характеристик та гідродинамічного стану розчину. Аналогічно до кліматичного контуру, керуючі дії формуються на основі відхилень між заданими та фактичними значеннями параметрів.

Обидва контури функціонують у замкненому режимі та мають спільну мету — підтримання стабільного середовища вирощування. При цьому їх робота не є незалежною, оскільки зміни у повітряному середовищі можуть впливати на стан живильного розчину і навпаки. Такий взаємний вплив обумовлює необхідність координації керуючих дій, що реалізується на середньому рівні ієрархії системи.

У структурній схемі системи керування об'єкт розглядається як багатоканальна динамічна система, на яку діють як керуючі впливи, так і зовнішні збурення. Керуючі впливи формуються відповідними регуляторами, що забезпечують зменшення відхилень параметрів від заданих значень. Збурення можуть бути пов'язані з тепловими втратами, змінами навколишнього середовища або особливостями біологічного розвитку рослин.

Інформаційні зв'язки у системі реалізуються через вимірювальні канали, які забезпечують зворотний зв'язок між об'єктом та регуляторами. Саме наявність такого зв'язку дозволяє системі автоматично компенсувати вплив збурень та підтримувати стабільність режиму роботи.

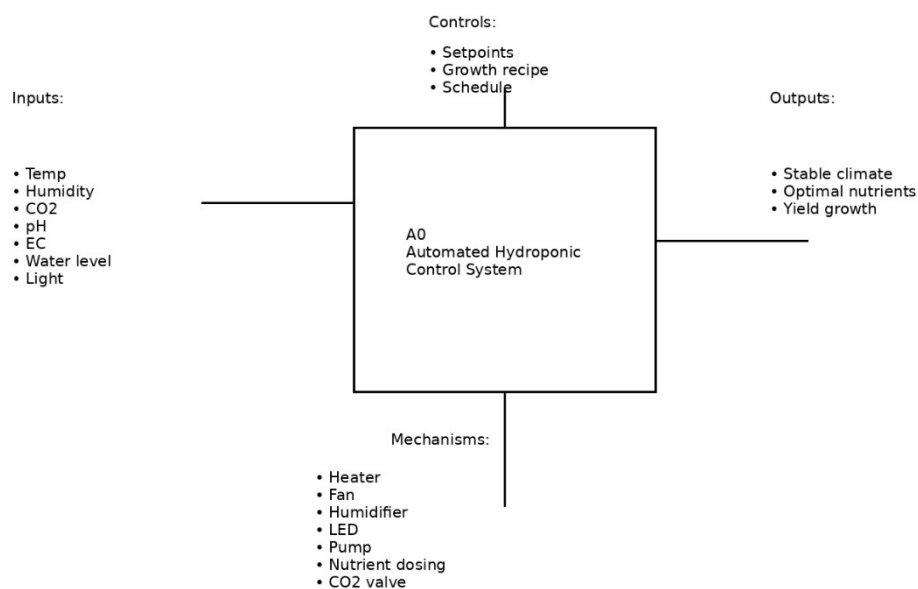
Таким чином, структурна схема системи керування включає об'єкт

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування, регулятори кліматичного та поживного контурів, канали вимірювання та канали формування керуючих впливів. Її побудова дозволяє перейти до математичного опису системи та визначити функціональні залежності між змінними.

Формування структурної схеми створює основу для подальшого синтезу математичної моделі гідропонної ферми як об'єкта керування, що є необхідною умовою для дослідження її динамічних властивостей та розробки алгоритмів регулювання.

IDEF0 Model A0: Hydroponic Automation System



Inputs (вхідні параметри) – сигнали з датчиків

Controls (керуючі впливи) – рецепти вирощування, уставки, графіки

Outputs (виходи) – стабілізоване середовище вирощування

Mechanisms (механізми) – виконавчі пристрої системи

Рисунок 2.2 – Функціональна модель системи автоматичного керування гідропонною фермою (IDEF0 / ISA-95)

Таким чином, структурна схема системи керування включає об'єкт керування, регулятори кліматичного та поживного контурів, канали вимірювання та канали формування керуючих впливів. Її побудова дозволяє перейти до математичного опису системи та визначити функціональні залежності між змінними.

Формування структурної схеми створює основу для подальшого синтезу математичної моделі гідропонної ферми як об'єкта керування, що є необхідною умовою для дослідження її динамічних властивостей та розробки алгоритмів регулювання.

2.1.3 Обґрунтування контурів автоматичного керування

Функціональна декомпозиція системи автоматизації гідропонної ферми, виконана у вигляді IDEF0-моделі A0, показує, що процес забезпечення стабільного середовища вирощування формується сукупністю взаємопов'язаних фізичних процесів. Їх динаміка визначається як тепло- та масообміном у повітряному середовищі, так і процесами розчинення, транспортування та споживання поживних речовин у рідкій фазі.

З позицій теорії автоматичного керування це означає, що об'єкт не може ефективно описуватись одним регулятором. Його стабілізація потребує багатоконтурної структури керування, де кожен контур відповідає за підтримання певного технологічного параметра.

Аналіз фізики процесів вирощування, а також існуючих підходів до автоматизації гідропонних систем, дозволяє виділити шість базових контурів автоматичного регулювання, які формують замкнену систему керування.

Загальні контури автоматичного керування

У складі системи виділяються наступні контури:

Контури кліматичного середовища

- температури повітря
- вологості повітря
- концентрації CO₂
- інтенсивності освітлення

Ці контури визначають умови протікання фотосинтезу, транспірації та теплообміну.

Контури живильного середовища

- кислотності (pH) розчину

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- концентрації поживних речовин (ЕС)

Вони забезпечують доступність макро- та мікроелементів для кореневої системи.

Необхідність структурної декомпозиції

Хоча всі шість контурів функціонують одночасно, їх фізична природа є різною:

- кліматичні параметри описуються тепловими та масообмінними процесами;
- параметри живильного середовища — хіміко-концентраційними процесами.

Крім того, ці групи параметрів характеризуються різними:

- часовими константами,
- інерційністю,
- механізмами впливу на рослини.

Температура та вологість змінюються порівняно швидко під дією виконавчих механізмів, тоді як рН або ЕС мають більшу інерційність через об'єм розчину та процеси змішування.

Саме ця відмінність робить доцільним поділ системи на два узагальнених контури керування.

Декомпозиція A0

В межах IDEF0-представлення система верхнього рівня A0 розкладається на дві функціональні підсистеми:

A1 — Контур керування кліматом об'єднує регулювання:

- температури,
- вологості,
- CO₂,
- освітлення.

Ці параметри формують повітряне середовище та визначають енергетичний баланс рослин.

Контур клімату характеризується: швидшою динамікою, значним

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливом зовнішніх збурень, необхідністю безперервного регулювання.

Виконавчі механізми цього контуру змінюють стан повітряного середовища безпосередньо, що дозволяє реалізувати ефективне замкнене регулювання.

A2 — Контур керування живленням об'єднує регулювання:

- рН,
- концентрації поживних речовин (ЕС).

Контур відповідає за стабілізацію хімічного складу живильного розчину.

Його особливості: повільніша динаміка, накопичувальний характер процесів, залежність від біологічного споживання.

Тут керування реалізується через зміну складу розчину шляхом дозування компонентів.

Функціональна роль двоконтурної структури

Поділ на A1 та A2 дозволяє:

- зменшити складність математичного опису;
- врахувати різну динаміку процесів;
- реалізувати незалежні регулятори;
- спростити синтез системи керування.

При цьому обидва контури залишаються взаємопов'язаними через спільний об'єкт — рослинну систему.

Наприклад:

- температура впливає на швидкість споживання поживних речовин;
- освітлення змінює інтенсивність метаболізму;
- вологість впливає на транспірацію і, відповідно, на водний баланс.

Таким чином формується ієрархічна структура:

- шість фізичних контурів;
- дві функціональні підсистеми;
- одна інтегрована система керування.

Обґрунтований поділ системи автоматичного керування гідропонною фермою на два інтегровані контури — кліматичний та поживний — дозволяє

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

перейти до побудови математичних моделей об'єкта керування.

Саме така структура буде покладена в основу подальшого синтезу двоконтурної системи регулювання та її реалізації у середовищі Simulink.

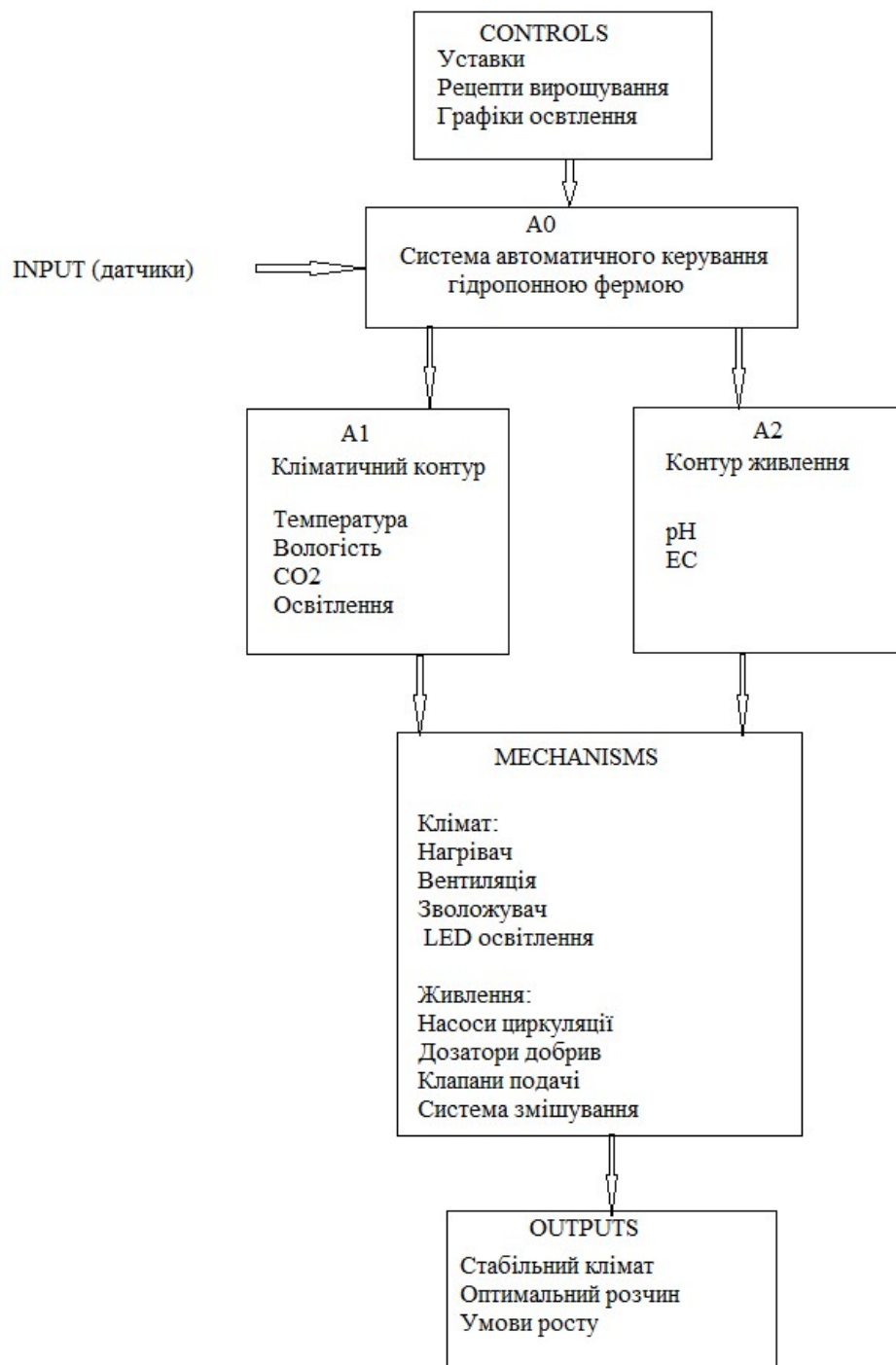


Рисунок 2.3 – Декомпозиція системи автоматичного керування гідропонною фермою (A0 → A1, A2)

2.1.4 Математична модель кліматичного контуру

2.1.4.1 Побудова та обґрунтування математичної моделі

Кліматичний контур гідропонної ферми формує повітряне середовище вирощування, яке визначає інтенсивність біологічних процесів рослин. З позицій автоматичного керування цей контур є багатопараметричним об'єктом із розподіленими властивостями, однак для задач синтезу системи регулювання його доцільно подати у вигляді зосередженої динамічної моделі.

В основу математичного опису покладається балансний підхід, згідно з яким зміна стану середовища визначається співвідношенням між надходженням та відведенням енергії або маси.

У кліматичному контурі регулюються чотири основні параметри:

- температура повітря;
- вологість;
- концентрація CO₂;
- освітленість.

Ці параметри мають різну фізичну природу, однак їх динаміка може бути описана аналогічними диференціальними рівняннями першого порядку.

Модель температурного режиму

Температура повітря змінюється під впливом:

- теплопостачання (нагрівач);
- тепловтрат;
- вентиляції;
- тепловиділення від освітлення.

Баланс тепла у замкненому об'ємі описується рівнянням:

$$C_t \frac{dT}{dt} = Q_h + Q_l - Q_v - Q_{loss}$$

де: T - температура повітря; C_t - теплоємність повітряного об'єму; Q_h - тепло від нагрівача; Q_l - тепло від освітлення; Q_v - втрати через вентиляцію; Q_{loss} - тепловтрати через огорожувальні конструкції.

Після лінеаризації отримуємо інерційну модель:

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{dT}{dt} = -\alpha_T T + b_T u_T + d_T$$

де u_T - керуючий вплив (потужність нагріву / вентиляції).

Модель вологості.

Вологість повітря визначається балансом водяної пари:

$$C_h \frac{dH}{dt} = W_p + W_h + W_v$$

де: H - відносна вологість; W_p - транспірація рослин; W_h - Зволоження; W_v - осушення через вентиляцію.

Після спрощення:

$$\frac{dH}{dt} = -\alpha_H H + b_H u_H + d_H$$

Модель концентрації CO₂.

Зміна концентрації газу визначається:

- подачею CO₂;
- споживанням рослинами;
- вентиляцією.

$$\frac{dC}{dt} = -\alpha_C C + b_C u_C + d_C$$

де u_C - відкриття клапана подачі CO₂

Модель освітленості.

Освітленість є найбільш швидкодіючим параметром і описується:

$$\frac{dL}{dt} = -\alpha_L L + b_L u_L$$

де u_L - потужність LED-освітлення.

Векторна форма моделі

Стан кліматичного контуру:

$$x = \begin{bmatrix} T \\ H \\ C \\ L \end{bmatrix}$$

Керування:

$$u = \begin{bmatrix} u_T \\ u_H \\ u_C \\ u_L \end{bmatrix}$$

Тоді система має вигляд:

$$\dot{x} = Ax + Bu + D$$

Передавальні функції.

Для задач синтезу регуляторів кожен канал подається як аперіодичне ланка:

$$W_i(s) = \frac{K_i}{T_i s + 1}$$

де: K_i - Коефіцієнт підсилення; T_i - постійна година.

Обґрунтування вибору моделі.

Таке подання є доцільним тому що: кліматичні процеси мають інерційний характер; зміна стану пропорційна різниці потоків; взаємні зв'язки можна врахувати як збурення.

Модель першого порядку адекватно описує реальну динаміку, придатна для PID-синтезу, легко реалізується у Simulink.

Отримана математична модель кліматичного контуру у вигляді системи аперіодичних ланок дозволяє перейти до побудови структури двоконтурної системи керування та подальшого синтезу регуляторів.

2.1.4.2 Модель контуру живлення (pH та ЕС)

Контур живлення забезпечує підтримання хімічного складу поживного розчину, від якого безпосередньо залежить доступність макро- і мікроелементів для рослин. На відміну від кліматичного середовища, процеси у рідкій фазі мають накопичувальний характер і визначаються масообміном та хімічною взаємодією компонентів.

Основними параметрами регулювання у цьому контурі є кислотність (pH) та електропровідність (ЕС), яка характеризує концентрацію розчинених солей.

Побудова математичної моделі базується на рівняннях матеріального балансу.

Модель концентрації поживних речовин (ЕС). Зміна концентрації поживного розчину визначається: подачею концентрату добрив, розбавленням водою, споживанням рослинами.

Баланс маси солей у розчині можна подати у вигляді:

$$V \frac{dC}{dt} = F_n C_n + F_w C + F_p C$$

де: C - концентрація поживних речовин; V - об'єм резервуара; F_n - витрата концентрату; C_n - концентрація концентрату; F_w - витрата води; F_p - швидкість споживання рослинами.

Після нормування отримуємо:

$$\frac{dC}{dt} = -a_{EC} C + b_{EC} u_{EC} + d_{EC}$$

де u_{EC} - сигнал керування дозатором добрив.

Електропровідність пропорційна концентрації:

$$EC = k_C C.$$

Отже, динаміка ЕС також має інерційний характер.

Модель кислотності (pH)

Кислотність визначається балансом кисло-лужних компонентів:

$$V \frac{dH^+}{dt} = F_a - F_b - F_p$$

де: F_a - подача кислотного розчину; F_b - подача лужного розчину; F_p - буферний ефект середовища.

Оскільки pH є логарифмічною функцією концентрації іонів водню:

$$pH = -\log[H^+]$$

у системах керування використовується лінеаризована модель:

$$\frac{dpH}{dt} = -a_{pH} pH + b_{pH} u_{pH} + d_{pH}$$

де u_{pH} - сигнал керування дозуванням кисло-лужних компонентів.

Станова модель контуру живлення.

Вектор стану:

$$x = \begin{bmatrix} EC \\ pH \end{bmatrix}.$$

Керування:

$$u = \begin{bmatrix} u_{EC} \\ u_{pH} \end{bmatrix}.$$

Отримуємо систему:

$$\dot{x} = Ax + Bu + D.$$

Передавальні функції.

Динаміка процесів у рідині характеризується повільнішою реакцією, тому кожен канал подається у вигляді:

$$W_{EC}(s) = \frac{K_{EC}}{T_{EC}s + 1}$$

$$W_{pH}(s) = \frac{K_{pH}}{T_{pH}s + 1}$$

де:

$$- T_{EC} > T_{\text{клімат}}$$

$$- T_{pH} > T_{EC}$$

Це відображає більшу інерційність процесів змішування.

Особливості моделі.

Контур живлення характеризується: накопичувальною природою; нелінійністю (особливо для pH); запізненням через змішування.

Однак у робочій області модель першого порядку забезпечує достатню точність для синтезу PID-регуляторів.

Математична модель контуру живлення дозволяє описати динаміку зміни EC та pH як інерційні процеси з керованим впливом через дозування компонентів.

Разом із кліматичним контуром вона формує повну динамічну модель об'єкта керування, що є основою для побудови двоконтурної системи автоматичного регулювання.

2.2 Розробка Simulink-моделі двоконтурної системи керування гідропонною фермою

2.2.1 Мета, задачі дослідження та умови моделювання

Метою моделювання є дослідження динамічних властивостей розробленої системи автоматичного керування гідропонною фермою, оцінка якості регулювання основних параметрів технологічного процесу, а також визначення впливу біологічних процесів рослин на поведінку системи в цілому.

Гідропонна ферма в закритій середовищі являє собою складну біотехнічну систему, в якій технічні засоби автоматизації взаємодіють із біологічним об'єктом керування – рослиною. На відміну від класичних об'єктів автоматичного управління, динаміка яких визначається виключно фізико-хімічними процесами, в даному випадку необхідно враховувати фізіологічні процеси, що мають нелінійний, інерційний та взаємопов'язаний характер.

Моделювання здійснювалося в середовищі MATLAB/Simulink з використанням розробленої математичної моделі, що включає контури регулювання температури, відносної вологості, концентрації CO_2 , електропровідності та кислотності питного розчину. Особливістю моделі є врахування фізіологічних процесів рослин у вигляді окремих функціональних блоків транспірації та фотосинтезу.

З метою адекватного відображення поведінки об'єкта управління у роботі застосовано підхід агрегованого моделювання, який передбачає введення узагальнених функціональних блоків, що описують сукупний вплив біологічних процесів. Такий підхід дозволяє забезпечити баланс між складністю моделі та її придатністю для інженерного аналізу та синтезу системи управління.

Для забезпечення комплексного аналізу система досліджується в трьох режимах функціонування: базовому режимі без урахування взаємних зв'язків між контурами, режимі із врахуванням зовнішніх збурень, а також у режимі з урахуванням біологічних процесів, що визначають взаємодію параметрів.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

В якості тестових впливів використовувалися ступінчасті сигнали завдання, а також збурення, що імітують зміну зовнішніх умов експлуатації системи. Тривалість моделювання обрана таким чином, щоб забезпечити повне завершення перехідних процесів для всіх контурів.

2.2.2 Принцип дії системи та алгоритм побудови Simulink-моделі

При побудові математичної моделі гідропонної системи управління використано принцип декомпозиції на окремі контури регулювання, кожен з яких описується диференціальними рівняннями першого порядку. Такий підхід є типовим для інженерних завдань автоматизації та дозволяє застосовувати класичні методи аналізу та синтезу систем автоматичного керування.

Кожний контур представлено у вигляді замкненої системи з негативним зворотнім зв'язком, що включає регулятор, об'єкт управління та вимірювальний канал. Динаміка об'єкта в кожному контурі апроксимується передаточною функцією аперіодичного зв'язку першого порядку, що має вигляд

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}$$

де K – коефіцієнт підсилення, T – стала часу процесу.

Вибір саме такої моделі обумовлений тим, що більшість технологічних процесів у теплицях характеризуються інерційною поведінкою без коливальних властивостей, що добре описується аперіодичними ланками. Крім того, це дозволяє спростити процедуру налаштування регуляторів та аналізу перехідних процесів.

На основі побудованих математичних моделей об'єкта керування реалізується двоконтурна система автоматичного регулювання, що охоплює кліматичний та живильний підконтури. Така структура обумовлена відмінностями у фізичній природі процесів, їх динаміці та інерційності.

Кліматичний контур забезпечує підтримання температури, вологості, концентрації CO₂ та освітленості, формуючи стабільне повітряне середовище вирощування. Контур живлення відповідає за стабілізацію кислотності (pH) та

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

концентрації поживних речовин (ЕС) у живильному розчині.

Обидва контури функціонують паралельно та взаємодіють через біологічні процеси росту рослин, що враховується у моделі у вигляді збурень. Така організація дозволяє забезпечити незалежне регулювання параметрів при збереженні цілісності технологічного режиму.

Розробка моделі здійснюється на основі декомпозиції системи керування на кліматичний та живильний контури. Кожен параметр об'єкта подається у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, що відповідає його інерційній природі.

До складу моделі включаються: блоки уставок; динамічні моделі об'єкта; PID-регулятори; канали зворотного зв'язку; збурювальні впливи.

Замикання контурів забезпечує формування системи автоматичного регулювання, у якій керуючі сигнали генеруються на основі відхилення поточних значень параметрів від заданих.

Особливістю даної роботи є врахування перехресних зв'язків між контурами, що виникають внаслідок біологічної природи об'єкта управління. На відміну від класичних технічних систем, де взаємодія між каналами часто є небажаною, в гідропонних установках вона є невід'ємною частиною функціонування системи.

2.2.3 Структурна схема Simulink-моделі двоконтурної системи керування

Структурна схема моделі формується на основі раніше визначеної декомпозиції системи на кліматичний та живильний контури. У середовищі моделювання кожен контур реалізується як замкнена система автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком.

Загальна модель складається з трьох функціональних рівнів:

- формування уставок;
- регулювання;
- динаміки об'єкта.

Загальна структура моделі.

Модель будується за принципом паралельного керування двома підсистемами:

→ контур клімату;

→ контур живлення.

Кожен контур містить: блок уставки, суматор похибки, PID-регулятор, модель об'єкта, вимірювальний блок (зворотний зв'язок).

Структура кліматичного контуру.

Кліматичний підконтур реалізується як сукупність чотирьох каналів регулювання: температури, вологості, CO₂, освітлення.

Кожен канал має типову структуру:

Уставка → Σ → PID → Модель параметра → Датчик → Зворотний зв'язок

Рисунок 2.4 -Типова структура каналу керування

Динаміка параметра описується аперіодичною ланкою першого порядку.

Збурення вводяться у вигляді: зміни зовнішньої температури, природного випаровування, споживання CO₂ рослинами.

Структура контуру живлення.

Контур живлення містить два канали:

– ЕС

– рН

Його структура аналогічна кліматичному контуру, однак характеризується більшою інерційністю.

Керуючі впливи формуються через: дозування добрив, подачу води, кислотно-лужну корекцію.

Модель також реалізується у вигляді аперіодичних ланок із запізненням, що відображає процес змішування розчину.

Виконуємо об'єднання контурів. Обидва підконтури інтегруються у спільну модель через блок збурень, який враховує їх взаємний вплив.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприклад:

- температура впливає на споживання води;
- освітлення змінює потребу у поживних речовинах.

У Simulink це реалізується через перехресні сигнали між підсистемами.

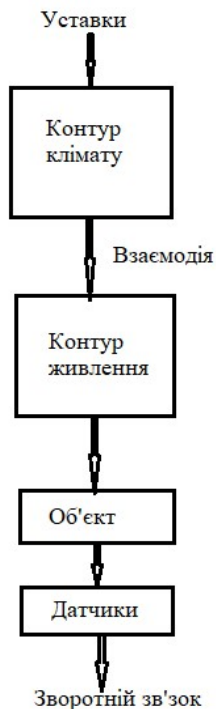


Рисунок 2.5 - Фінальна структура моделі

Побудована структура дозволяє реалізувати моделювання перехідних процесів, дослідити вплив збурень, виконати налаштування PID-регуляторів, стійкість системи.

Сформована структурна схема Simulink-моделі забезпечує основу для подальшого дослідження динамічних властивостей двоконтурної системи керування гідропонною фермою.

2.2.4 Реалізація моделі в Simulink

Реалізація двоконтурної системи керування у середовищі Simulink здійснюється шляхом послідовного формування підсистем відповідно до структурної схеми моделі. Кожен контур подається як замкнена система автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком.

Формування підсистем. На верхньому рівні моделі створюються дві підсистеми:

- Climate Control
- Nutrient Control

Вони реалізують відповідно кліматичний та живильний контури.

До складу верхнього рівня також входять: блоки уставок; блок збурень; блоки спостереження (Scope).

Реалізація каналу регулювання (типова структура). Кожен параметр моделюється за однаковою логікою (див. рисунок 2.4)

Кліматичний контур. У підсистемі Climate Control реалізуються чотири канали:

Температура

Використовуються блоки: Step (уставка), Sum, PID Controller, Transfer Function

Вологість

Аналогічна структура з власними параметрами динаміки.

CO₂

Додатково враховується збурення у вигляді споживання.

Освітлення

Модель має мінімальну інерційність.

Кожен канал має власний зворотний зв'язок.

Контур живлення. У підсистемі Nutrient Control формуються два канали:

ЕС: уставка концентрації, PID-регулятор, модель змішування.

pH: уставка кислотності, PID-регулятор, модель хімічної корекції.

Динаміка реалізується через інерційні ланки з більшою постійною часу.

Введення збурень

У модель додаються зовнішня температура, випаровування, біологічне споживання.

У Simulink це реалізується через блоки: Step, Signal Builder, Random Signal

Формування зворотного зв'язку

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вихід кожної моделі подається на: Score (візуалізація); Sum (порівняння з уставкою).

Це забезпечує замкненість контурів.

Після реалізації підсистем виконуємо інтеграцію контурів, вони об'єднуються у єдину модель. Між ними вводяться перехресні впливи:

- температура → вплив на ЕС;
- освітлення → вплив на рН.

Це підвищує адекватність моделі.

Підготовка до моделювання

На завершальному етапі встановлюється час моделювання, задаються початкові умови, перевіряється замкненість контурів.

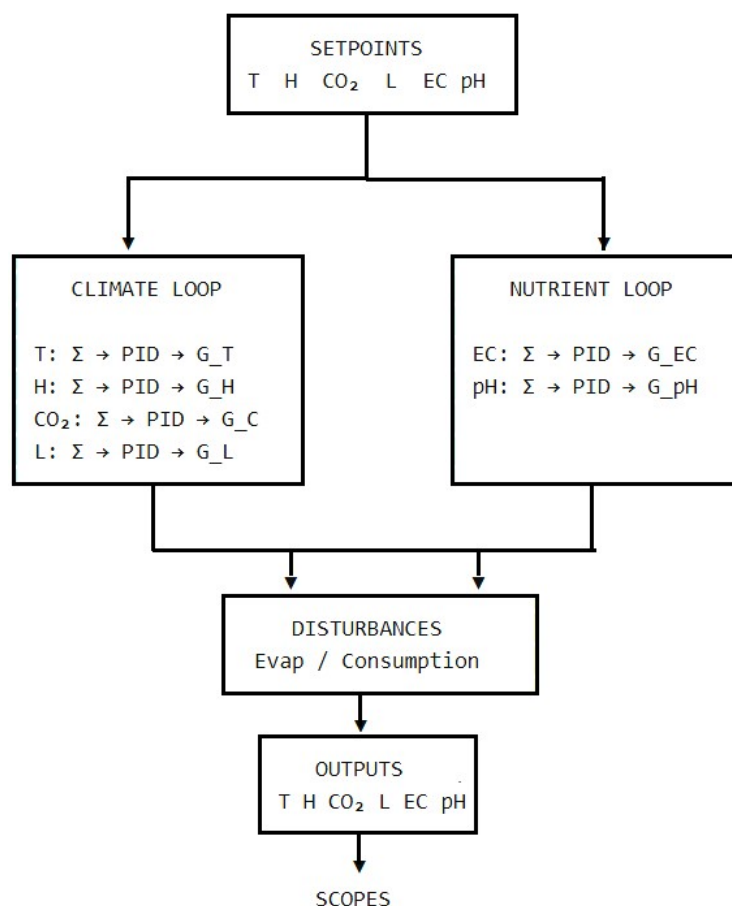


Рисунок 2.6 - Структурна схема моделі

При дослідженні перехідних процесів треба визначитися з часом моделювання. Час моделювання визначається найбільш інерційним контуром.

Таблиця 2.1 - Час перехідного процесу для кожного контуру

Контур	Постійна часу Т (с)	Характер
Освітлення	~10	швидкий
CO ₂	~40	середній
Температура	~50	середній
Вологість	~70	повільний
ЕС	~120	дуже повільний
pH	~180	найповільніший

Рекомендований час моделювання $t_{sim} = (5...7) \times T_{max}$, де $T_{max} = 180$ с (pH)

Таким чином, $t_{sim} = 900...1200$ с, що ідеально — покриває всі процеси. Для роботи визначаємо час моделювання: 1000 с.

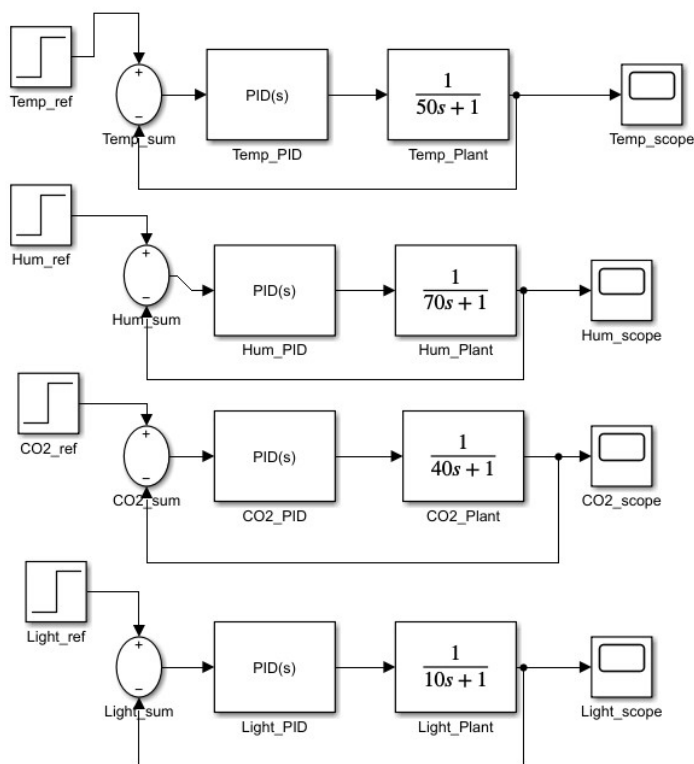


Рисунок 2.7 – Структурна схема моделі підсистеми кліматичного контуру гідропонною фермою у середовищі Simulink

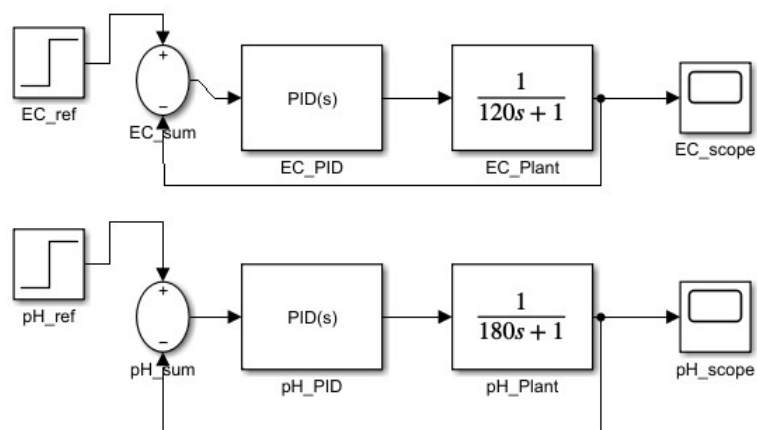


Рисунок 2.8 – Структурна схема моделі підсистеми контуру живлення гідропонною фермою у середовищі Simulink

В роботі досліджуємо перехідні процеси:

Реакція на стрибок уставки (Step Response) для кожного параметра:

- Т (температура)
- Н (вологість)
- CO₂
- L (світло)
- ЕС
- рН

Вхід: Step

Вихід: реакція системи

Для дослідження динамічних властивостей системи автоматичного керування було обрано час моделювання 1000 с, що відповідає 5–6 кратній найбільшій постійній часу об'єкта.

Перехідні процеси досліджувалися при ступінчастій зміні уставок, а також далі при дії збурень. Оцінка якості регулювання здійснювалася за показниками часу регулювання, перерегулювання та статичної похибки.

Параметри передаточних функцій об'єкта керування обрано на основі характерних часових констант технологічних процесів. Коефіцієнти підсилення

прийняті рівними одиниці у зв'язку з нормалізацією моделі.

Таблиця 2.2 - Параметри контурів системи

Контур	K	T (с)	Kp	Ki	Kd
Температура	1	50	2.0	0.05	5
Вологість	1	70	1.5	0.03	4
CO ₂	1	40	2.5	0.06	3
Освітлення	1	10	3.0	0.10	1
ЕС	1	120	1.0	0.02	8
pH	1	180	0.8	0.015	10

Налаштування PID-регуляторів виконано з урахуванням інерційності об'єктів: для швидких процесів застосовано більші значення коефіцієнта пропорційної складової, тоді як для повільних — зменшено коефіцієнт підсилення та підвищено демпфування.

На початковому етапі моделювання система розглядалася у нормалізованому вигляді, де одиничний ступеневий вплив відповідає безрозмірним величинам. Для забезпечення фізичної інтерпретації результатів уставки параметрів були масштабовані до реальних технологічних значень.

Це дозволило отримати перехідні процеси у фізичних одиницях (°C, %, ppm, mS/cm, pH), що підвищує наочність та практичну значущість моделі.

Початкове налаштування регуляторів призводило до коливального характеру перехідних процесів, що свідчило про недостатнє демпфування системи.

Результати моделювання шести контурів загально двоконтурної системи зведені в додатку А рисунки А.1-А6.

Шляхом зменшення коефіцієнтів пропорційної та інтегральної складових було досягнуто аперіодичного характеру перехідних процесів, що відповідає вимогам до систем автоматичного керування технологічними процесами.

Таблиця 2.3 - Скоригований набір коефіцієнтів для регуляторів

Контур	Kp	Ki	Kd
Температура	1.2	0.01	2
Вологість	1.0	0.008	2
CO ₂	1.5	0.01	2
Освітлення	2.0	0.05	0.5
ЕС	0.8	0.005	4
pH	0.6	0.003	5

Результати моделювання шести контурів скоригованої системи див. Додаток Б, рисунки Б.1-Б.6.

Аналіз перехідних процесів у базовому режимі. У базовому режимі моделювання всі контури системи функціонують незалежно один від одного без урахування взаємних зв'язків та зовнішніх збурень. Такий підхід дозволяє оцінити якість налаштування регуляторів та базові динамічні характеристики системи.

Аналіз перехідних процесів показує, що система забезпечує стійке регулювання всіх параметрів із прийнятними показниками якості. Перехідні процеси мають аперіодичний або слабо коливальний характер, що свідчить про коректний вибір параметрів PID-регуляторів.

Для контуру температури характерною є відносно швидка реакція на зміну завдання, що пояснюється невеликою інерційністю теплових процесів у керованому об'ємі. Час встановлення знаходиться в допустимих межах, а перерегулювання є незначним.

Контур вологості демонструє дещо більшу інерційність, що обумовлено складністю процесів масообміну. Незважаючи на це система забезпечує плавний вихід на задане значення без суттєвих коливань.

Для контуру концентрації CO₂ характерною є більш повільна динаміка, що пов'язано із обмеженою швидкістю зміни газового складу повітря. Водночас відсутність значних коливань свідчить про достатню робастність системи.

Контури електропровідності та кислотності живильного розчину характеризуються високою інерційністю, проте їх регулювання також є стійким та не викликає проблем з точки зору якості керування.

Таким чином, у базовому режимі система демонструє задоволені характеристики, що підтверджує правильність синтезу регуляторів та адекватність прийнятої математичної моделі.

2.2.5 Урахування збурень та міжконтурних зв'язків у моделі системи керування

В реальних умовах функціонування гідропонної системи на параметри середовища впливають чисельні зовнішні фактори, такі як зміни температури навколишнього середовища, коливання освітленості, а також технологічні впливи, пов'язані з подачею питального розчину.

Побудова математичної та імітаційної моделі системи автоматичного керування гідропонною фермою не може обмежуватися лише описом замкнених регуляторних контурів у ідеалізованих умовах. Реальні технологічні процеси функціонують під дією зовнішніх і внутрішніх збурюючих факторів, які істотно впливають на динаміку керованих параметрів, змінюють характер перехідних процесів та ускладнюють роботу системи регулювання. У зв'язку з цим до складу моделі доцільно включати як зовнішні збурення, так і взаємні впливи між контурами, які у межах розглянутої структури також можуть інтерпретуватися як збурювальні канали.

У загальному випадку збурення є сигналами, що порушують сталий режим роботи системи та викликають відхилення вихідних змінних від заданих значень. Для біотехнічних систем, до яких належить гідропонна ферма, характерними є як зовнішні збурення, пов'язані зі зміною умов навколишнього середовища, так і внутрішні, обумовлені взаємодією окремих технологічних підсистем. Саме тому модель повинна відображати не лише реакцію об'єкта на керуючі впливи, а й здатність системи компенсувати небажані зміни, що виникають у процесі експлуатації.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вплив зовнішніх збурень. До зовнішніх збурень у гідропонній системі відносять фактори, які діють на об'єкт керування ззовні та не залежать безпосередньо від роботи регуляторів. У випадку закритого простору до таких факторів належать коливання температури навколишнього середовища, зміни інтенсивності природного освітлення, відкривання дверей або технологічних отворів, нестабільність електроживлення виконавчих механізмів, а також випадкові зміни вологообміну між рослинами та повітряним середовищем. Для живильного контуру зовнішніми збуреннями є коливання витрати води, нерівномірність змішування розчину, зміна інтенсивності споживання поживних речовин рослинами та можливі відхилення в роботі дозувальних пристроїв.

У моделі зовнішні збурення доцільно реалізовувати у вигляді додаткових сигналів, що подаються на вхід об'єкта керування перед його динамічною ланкою. З практичної точки зору найзручнішим є використання ступінчастих впливів, оскільки вони дозволяють дослідити реакцію системи на різку зміну умов і наочно оцінити якість компенсації. У Simulink така реалізація здійснюється шляхом введення окремих джерел сигналу з подальшим підсумовуванням із керуючим впливом регулятора. У результаті формується сумарний сигнал, який відображає реальний стан входу об'єкта за наявності як керуючої дії, так і зовнішнього збурення.

Такий підхід є методично доцільним, оскільки дозволяє дослідити робастність системи, тобто її здатність зберігати прийнятну якість регулювання за наявності невизначеностей та випадкових впливів. Особливо важливим це є для контурів температури, вологості та концентрації CO₂, які найбільш чутливі до змін зовнішніх умов.

Ідея введення збурень у Simulink збурення вводиться:

$$u = u_PID + d(t),$$

тобто перед об'єктом керування через суматор.

Типи збурень для гідропоніки, а саме кліматичний контур має наступні зовнішні впливи.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.4 - Зовнішні збурення в кліматичному контурі

Параметр	Збурення
Температура	зміна зовнішньої температури
Вологість	відкриття системи вентиляції
CO ₂	витік або споживання рослинами
Освітлення	коливання напруги

Для контуру живлення аналогічна схема дає змогу оцінити реакцію системи на зміну складу та концентрації поживного розчину.

Таблиця 2.5 - Зовнішні впливи в контурі живлення

Параметр	Збурення
ЕС	поглинання солей рослинами
pH	біохімічні реакції

Для реалізації в моделі застосовуємо параметри, що зведені нижче в таблиці для усіх зазначених контурів, як кліматичного так і контура живлення.

Таблиця 2.6 - Параметри для моделювання зовнішніх збурень

Контур	Час (с)	Коефіцієнт передачі
Температура	200	-0.3
Вологість	300	+0.2
CO ₂	250	-0.25
Світло	150	-0.4
ЕС	400	-0.2
pH	500	+0.15

Окрім зовнішніх факторів, система характеризується наявністю взаємозв'язків між окремими контурами керування. У гідропонній фермі параметри клімату та живлення не є незалежними, оскільки вони пов'язані через фізіологічні процеси рослин. Тому зміна одного параметра неминуче

впливає на інші, що в моделі доцільно трактувати як внутрішні збурення або перехресні канали впливу.

Так, температура повітря впливає на інтенсивність транспірації, а отже, опосередковано змінює вологість у камері вирощування. Зі свого боку, електропровідність живильного розчину визначає доступність елементів живлення і впливає на інтенсивність метаболічних процесів, що також відбивається на вологообміні. Концентрація CO_2 , у свою чергу, залежить від швидкості фотосинтезу, яка визначається не лише освітленістю, а й температурою, кислотністю та станом живлення. Таким чином, одна й та сама зміна у певному контурі може бути як безпосереднім наслідком зовнішнього збурення, так і результатом впливу іншого каналу керування.

Фізична сутність взаємного впливу. У гідропонній системі контури не є незалежними:

Якщо параметри кліматичного контуру впливають на контур живлення, наприклад контур температури:

- температура впливає на розчинність солей $\rightarrow \text{EC}$;
- температура впливає на хімічні реакції $\rightarrow \text{pH}$.

У випадку якщо навпаки, контур живлення дає вплив на контури клімату, то відбувається наступний вплив:

- транспірація $\rightarrow$ вплив на вологість;
- активність рослин $\rightarrow$ вплив на CO_2 .

У межах математичної моделі ці взаємозв'язки доцільно вводити як додаткові сигнали, що надходять на вхід відповідного контуру через коефіцієнти зв'язку та, за потреби, через інерційні ланки першого порядку. Такий підхід дозволяє не лише врахувати сам факт перехресного впливу, а й відобразити його часові характеристики. Наприклад, вплив вологості на концентрацію CO_2 може проявлятися не миттєво, а через певний проміжок часу, що відповідає фізичній природі процесів газообміну та транспірації. Аналогічно, вплив електропровідності та кислотності на вологість і CO_2 доцільно описувати як повільні, інерційні взаємодії, які формуються через

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

біологічну активність рослин.

Таким чином, міжконтурні зв'язки у моделі виконують подвійну роль. З одного боку, вони відображають реальні фізіологічні механізми функціонування рослинної системи, а з іншого — виступають додатковими збурювальними каналами, які ускладнюють роботу регуляторів. Саме тому їх включення є необхідною умовою для адекватного моделювання реальної гідропонної ферми.

Фізична інтерпретація взаємних впливів. Найбільш характерним прикладом взаємного впливу є канал $\text{Hum} \rightarrow \text{CO}_2$, який відображає зв'язок між вологістю повітря та інтенсивністю газообміну. Підвищення вологості змінює стан продихів, впливає на транспірацію та, як наслідок, змінює динаміку споживання CO_2 рослинами. У моделі цей зв'язок може бути представлений як додатковий сигнал, що надходить у контур CO_2 після відповідного коефіцієнта підсилення або інерційної ланки.

Іншим важливим каналом є $\text{EC} \rightarrow \text{Hum}$, який відображає вплив концентрації поживних речовин на водний баланс рослин. Зміна електропровідності розчину впливає на осмотичний тиск у кореневій зоні, що позначається на швидкості всмоктування води та, відповідно, на вологості повітря в теплиці. У моделі такий вплив доцільно трактувати як внутрішнє збурення кліматичного контуру.

Канал $\text{EC} \rightarrow \text{CO}_2$ відображає вплив живлення на інтенсивність біохімічних процесів, зокрема фотосинтезу. При оптимальному рівні поживних речовин підвищується біологічна активність рослин, що збільшує споживання CO_2 . Отже, цей зв'язок у моделі слід розглядати як повільний, але суттєвий зворотний вплив живильного контуру на газовий баланс.

Окремо слід виділити канал $\text{pH} \rightarrow \text{CO}_2$, який враховує залежність засвоєння елементів живлення та інтенсивності метаболізму від кислотності розчину. Зміна pH впливає на доступність мікро- і макроелементів, а через це - на активність фотосинтезу та, як наслідок, на концентрацію CO_2 у повітрі. У моделі цей канал також доцільно реалізовувати як збурювальний вплив із

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

певною часовою затримкою.

Реалізація збурень і міжконтурних зв'язків у моделі.

З погляду структурної побудови моделі збурення та міжконтурні зв'язки реалізуються за єдиним принципом: на вході динамічної ланки кожного контуру формується сумарний сигнал, який складається з основного керуючого впливу, зовнішніх збурень та сигналів від інших контурів. Це дозволяє представити систему у вигляді узагальненої структури з кількома каналами входу, кожен з яких має власну фізичну інтерпретацію.

У Simulink така схема реалізується шляхом використання суматорів, блоків підсилення та, за необхідності, інерційних ланок.

Взаємний вплив вводиться як:

$$y_i \rightarrow k_{ij} \rightarrow \text{SUM іншого контуру}$$

тобто вихід одного каналу стає збуренням для іншого.

Зовнішні збурення подаються у вигляді ступінчастих сигналів, що імітують різкі зміни умов. Міжконтурні зв'язки формуються через сигнали, які передаються з виходу одного контуру на вхід іншого з відповідним коефіцієнтом впливу. Якщо потрібно врахувати затримку реакції, між сигналом зв'язку та суматором вводиться інерційна ланка з заданою сталою часу.

Такий підхід має важливе методичне значення, оскільки дозволяє поступово ускладнювати модель: від ідеалізованої системи без збурень до повноцінної багатоконтурної структури з урахуванням фізіологічних зв'язків. Це, у свою чергу, дає можливість провести порівняльний аналіз якості регулювання в різних сценаріях і визначити, наскільки суттєво взаємодія між контурами впливає на стійкість та швидкодію системи.

Отже, у моделі системи автоматичного керування гідропонною фермою збурення розглядаються у двох аспектах. По-перше, це зовнішні впливи, що відображають зміну умов експлуатації та порушують сталий режим роботи окремих контурів. По-друге, це міжконтурні зв'язки, які, хоча і є природними для біотехнічної системи, у межах моделі також виступають як внутрішні збурення.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

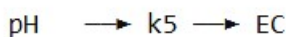


Рисунок 2.9 – Узагальнена структура взаємних зав’язків

Урахування обох груп впливів є необхідною умовою для побудови адекватної моделі, оскільки воно дозволяє відобразити реальні фізико-біологічні процеси, що відбуваються у гідропонній фермі. Саме на цій основі можна досліджувати робастність системи, оцінювати якість регулювання та обґрунтовувати доцільність застосування конкретних алгоритмів керування.

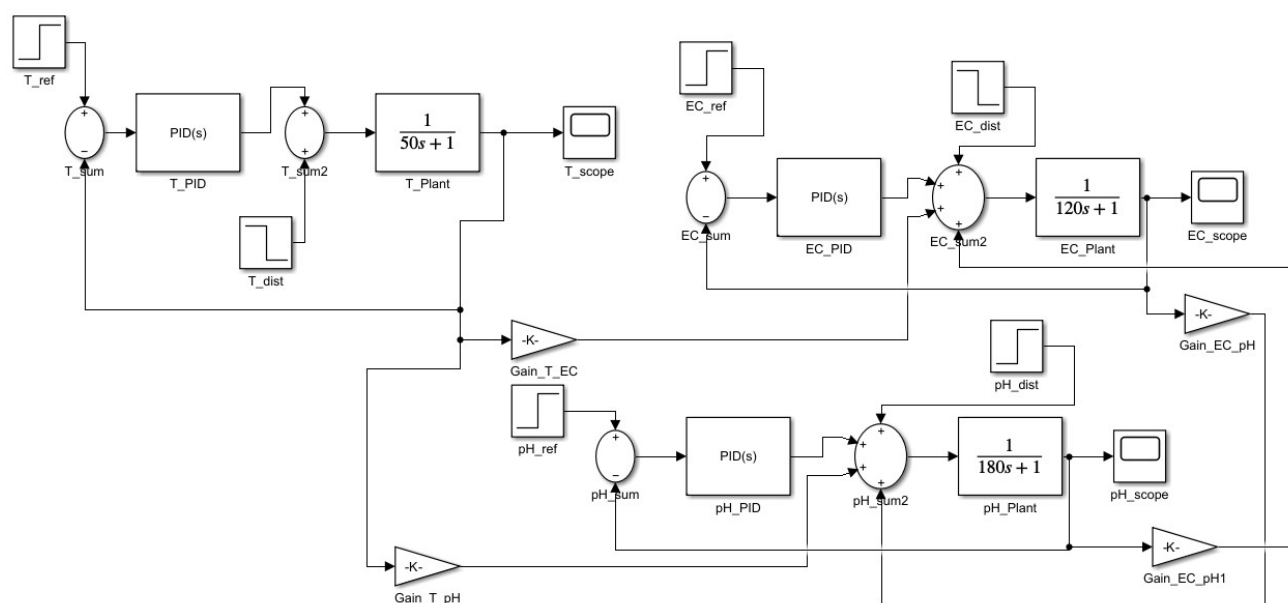


Рисунок 2.10 – Дослідження моделі з урахуванням зовнішніх збурень, що діють на систему від зміни температури навколишнього середовища

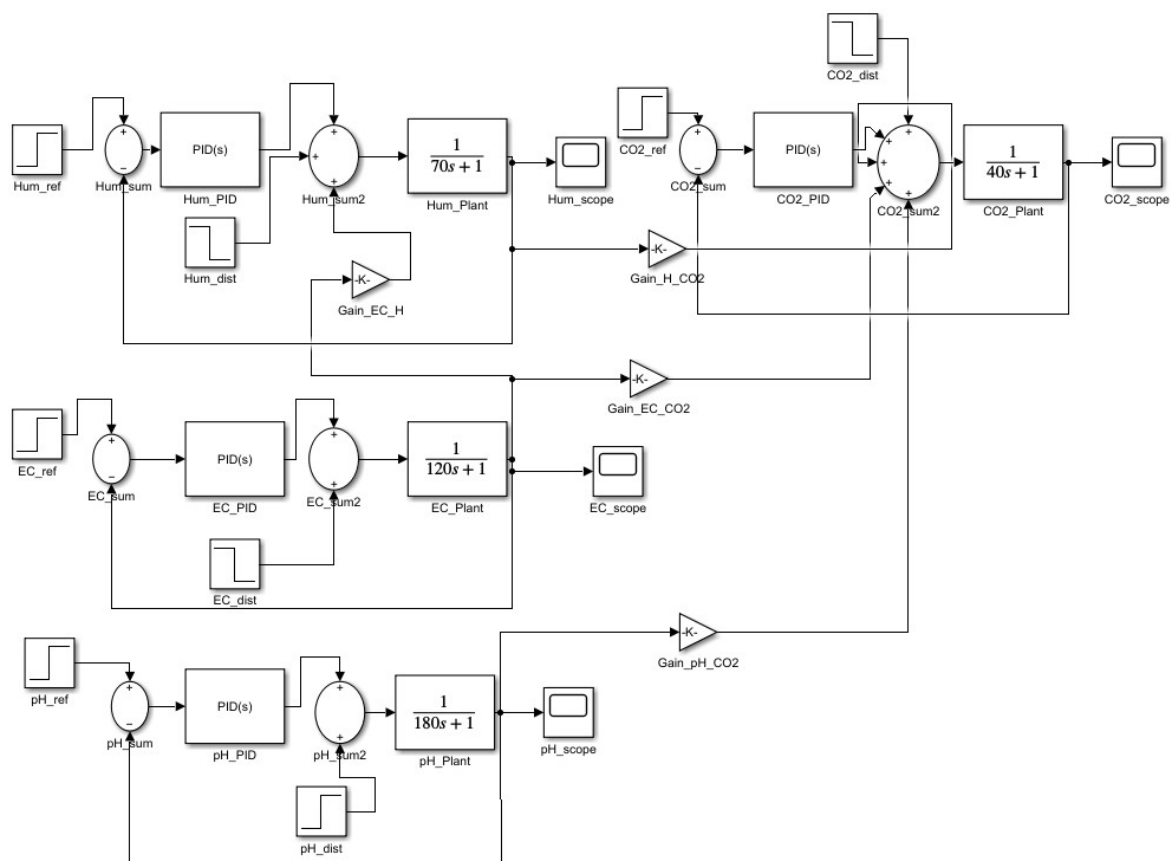


Рисунок 2.11 – Дослідження моделі з урахуванням зовнішніх збурень, що діють на систему від зміни вологості навколишнього середовища, лужності та електропровідності живильного розчину на виділення вуглекислого газу

Результати моделювання, а саме графіки перехідних процесів наведені в додатку В рисунки В.1-В.7.

2.2.6 Математичне моделювання та аналіз фізіологічних процесів у гідропонній системі

Моделювання блоку біологічної активності рослин (Plant Activity).

У процесі побудови імітаційної моделі системи автоматичного керування гідропонною фермою виникає необхідність урахування впливу біологічного об'єкта керування – рослин – на параметри технологічного середовища. На відміну від технічних підсистем, поведінка рослин визначається складними фізіологічними процесами, які мають нелінійний, багатофакторний та інерційний характер. Безпосереднє математичне описання цих процесів у

повному обсязі є надмірно складним і недоцільним для задач інженерного синтезу систем керування. У зв'язку з цим у роботі застосовано підхід узагальненого моделювання, відповідно до якого біологічна активність рослин представлена у вигляді функціонального блоку *Plant Activity*, що реалізує концепцію «чорного ящика».

Зазначений блок приймає на вхід основні параметри середовища, сформовані кліматичним та живильним контурами, та формує вихідні сигнали, які відображають сукупний вплив фізіологічних процесів на стан середовища вирощування. Таким чином, *Plant Activity* виступає інтегруючою ланкою між контурами керування та забезпечує фізично обґрунтовану взаємодію між ними.

Функціонально блок *Plant Activity* охоплює чотири основні групи процесів: фотосинтез, транспірацію, споживання поживних речовин та газообмін. Кожен із цих процесів має власну динаміку та різний ступінь впливу на параметри середовища, що обумовлює необхідність їх роздільного врахування у структурі моделі.

Процес фотосинтезу визначає інтенсивність поглинання діоксиду вуглецю та є ключовим фактором формування газового складу повітря у теплиці. У моделі він представлений у вигляді інерційної ланки першого порядку з відносно великою сталою часу, що відображає затримку між зміною умов середовища та реакцією рослин. Вхідними величинами для цього процесу є температура, концентрація CO_2 , електропровідність та кислотність живильного розчину, тоді як вихідним сигналом виступає зміна концентрації CO_2 , що має від'ємний знак відносно балансу системи.

Транспірація описує процес випаровування води через поверхню листя і безпосередньо впливає на вологість повітря. Даний процес характеризується значно меншою інерційністю порівняно з фотосинтезом, що обумовлено швидким реагуванням рослин на зміну температури та вологості. У моделі транспірація також реалізована у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, але з меншою сталою часу. Вхідними параметрами є температура, відносна вологість та концентрація поживних речовин, тоді як вихід формує додатковий

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вплив на контур вологості.

Споживання поживних речовин відображає процес засвоєння мінеральних компонентів із живильного розчину, що визначає зміну його електропровідності та кислотності. Цей процес є відносно повільним і залежить від загальної фізіологічної активності рослин. У моделі він враховується через вплив на контури ЕС та рН у вигляді інерційних сигналів, що формують додаткові навантаження на систему регулювання.

Газообмін об'єднує процеси поглинання CO₂ та виділення кисню, а також взаємодію між повітряним та рослинним середовищем. У рамках прийнятого підходу він не виділяється як окремий блок, а інтегрується у моделі фотосинтезу та транспірації, що дозволяє уникнути надлишкової деталізації та зберегти компактність моделі.

З точки зору структурної реалізації, блок *Plant Activity* має кілька входів, які відповідають параметрам середовища, та кілька виходів, що формують збурювальні впливи на відповідні контури керування. Вихідні сигнали цього блоку подаються на входи контурів вологості, концентрації CO₂ та частково на контури живлення, де вони враховуються разом із керуючими впливами регуляторів. Така організація дозволяє інтерпретувати вплив рослин як внутрішні збурення, що змінюють динаміку системи.

Важливою особливістю запропонованого підходу є використання різних сталих часу для окремих фізіологічних процесів. Зокрема, транспірація моделюється як швидкодіючий процес із малою інерційністю, тоді як фотосинтез і споживання поживних речовин характеризуються значною затримкою. Це дозволяє відобразити реальну різницю у швидкості реакції рослин на зміну умов середовища та забезпечити більш адекватне відтворення перехідних процесів.

Запропонована модель блоку *Plant Activity* дозволяє перейти від спрощеного опису об'єкта керування до більш реалістичного уявлення про його поведінку. Включення цього блоку у загальну структуру системи призводить до появи додаткових каналів взаємодії між контурами, що ускладнює задачу

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування, але водночас забезпечує більш достовірні результати моделювання.

Отже, використання узагальненого блоку біологічної активності рослин є доцільним компромісом між точністю та складністю моделі. Такий підхід дозволяє врахувати основні фізіологічні процеси без необхідності їх детального математичного опису та створює основу для подальшого дослідження впливу біологічного об'єкта на ефективність системи автоматичного керування.

Вхідними сигналами блоку є параметри середовища, сформовані відповідними контурами керування, зокрема температура повітря, відносна вологість, концентрація CO_2 , електропровідність та кислотність живильного розчину. Ці сигнали подаються паралельно на всі підблоки, однак кожен із них формує власну динамічну реакцію залежно від фізичної природи процесу.

Підблок фотосинтезу характеризується найбільшою інерційністю та реалізується передаточною функцією аперіодичної ланки першого порядку з великою сталою часу. Його вихід формує зміну концентрації CO_2 , що відображає процес його споживання рослинами.

Підблок транспірації є швидкодіючим та описується аперіодичною ланкою з малою сталою часу. Вихід цього блоку впливає на вологість повітря, формуючи додатковий збурювальний вплив у відповідному контурі.

Підблок споживання поживних речовин моделює зміну електропровідності та кислотності розчину, що пов'язано із засвоєнням мінеральних компонентів рослинами. Його динаміка є повільною та визначається загальним рівнем біологічної активності.

Газообмін інтегрує процеси поглинання CO_2 та взаємодії з повітряним середовищем і частково перекривається з фотосинтезом, однак виділяється для підвищення структурної наочності моделі. Він формує додатковий вплив на контур CO_2 та частково на вологість.

Вихідні сигнали всіх підблоків підсумовуються та подаються на відповідні контури системи керування як внутрішні збурення. Така структура дозволяє врахувати різну інерційність процесів та забезпечити адекватне відображення взаємного впливу біологічних та технічних підсистем.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

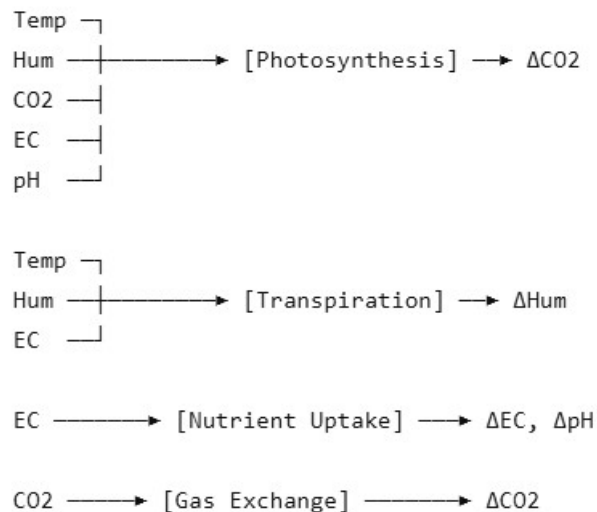


Рисунок 2.12 – Структурна схема інтеграції блоку біологічної активності рослин (Plant Activity)

$$G_{pH}(s) = \frac{k_{pH}}{T_{pH}s + 1}$$

$$T_{pH} \approx 120c$$

$$G_{tr}(s) = \frac{k_{tr}}{T_{tr}s + 1}$$

$$T_{tr} \approx 30c$$

$$G_{nut}(s) = \frac{k_{nut}}{T_{nut} + 1}$$

$$T_{nut} \approx 150-300c$$

$$G_{gas}(s) = \frac{k_{gas}}{T_{gas}s + 1}$$

$$T_{gas} \approx 60-90c.$$

Інтеграція моделей транспірації та фотосинтезу в загальну структуру системи управління здійснюється шляхом введення додаткових каналів впливу на відповідні контури. Зокрема, вихід блоку транспірації подається на вхід контуру вологості, тоді як вихід блоку фотосинтезу впливає на контур регулювання концентрації CO₂.

Такий підхід дозволяє перейти від прямого моделювання перехресних зв'язків між параметрами до більш фізично обґрунтованої структури, в якій всі

взаємодії реалізуються через біологічний об'єкт. Це забезпечує узгодженість динаміки системи та спрощує інтерпретацію результатів моделювання.

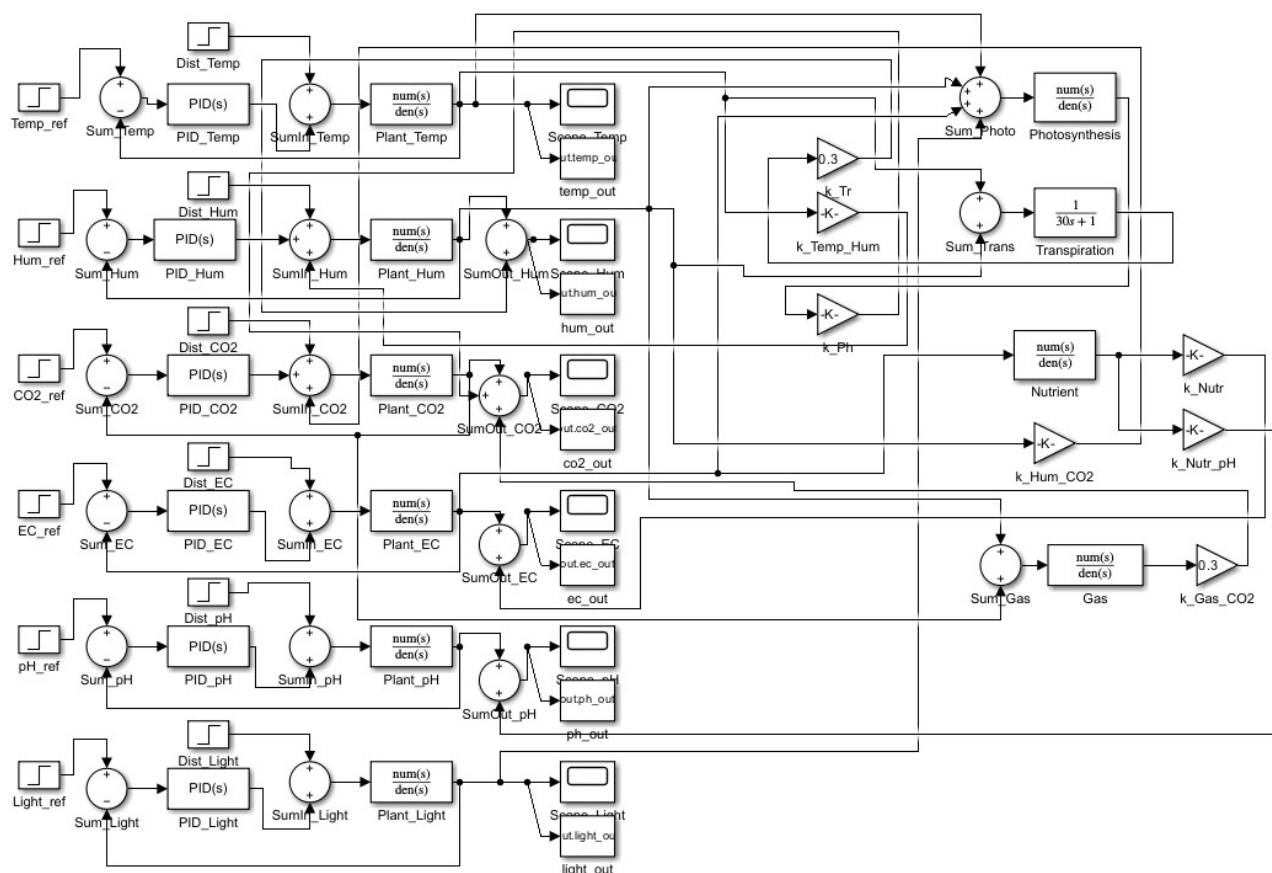


Рисунок 2.13 Структурна схема моделювання автоматичної системи гідропоніки з урахуванням зовнішніх збурень, перехресних зв'язків між контурами клімату та живлення та біологічних процесів контурів *Plant Activity*

Важливо відзначити, що врахування біологічних процесів дозволяє отримати більш реалістичну поведінку системи, яка відповідає фізичним закономірностям функціонування гідропонних установок. Зокрема, спостерігається взаємний вплив параметрів, що не може бути враховано у спрощених моделях.

Таким чином, введення блоків транспірації та фотосинтезу є необхідним для адекватного моделювання системи та підвищення точності результатів.

Крім того, введення єдиного центру взаємодії у вигляді блоку біологічної активності дозволяє уникнути дублювання зв'язків та забезпечити масштабованість моделі у разі її подальшого ускладнення.

Результати моделювання динамічних процесів поведінки системи під впливом біологічних процесів відображені в додатку Г рисунки Г.1-Г.6.

2.2.7 Порівняльний аналіз режимів моделювання

Для більш повного дослідження було проведено порівняння результатів моделювання у трьох режимах: базовому, із збуреннями та з урахуванням біологічних процесів.

Порівняння показує, що в базовому режимі система демонструє найкращі показники якості регулювання, що обумовлено відсутністю взаємних впливів між контурами. Однак такий режим є спрощеним і не відображає реальних умов експлуатації.

У режимі із збуреннями спостерігається погіршення показників якості, зокрема збільшення часу встановлення та поява перерегулювання. Це є природним наслідком впливу зовнішніх факторів.

Найбільш складним є поведінка системи в режимі з урахуванням біологічних процесів. У цьому випадку система демонструє найменшу швидкодію та найбільшу взаємозалежність параметрів, однак саме цей режим є найбільш наближеним до реальних умов.

Отримані результати свідчать про те, що спрощені моделі можуть бути використані лише для попереднього аналізу, тоді як для синтезу систем управління необхідно враховувати біологічні процеси.

2.3 Реалізація алгоритму керування у середовищі Node-RED та інтеграція з MATLAB Simulink

2.3.1 Загальна концепція інтеграції

Алгоритм автоматичного керування гідропонною фермою реалізовано у середовищі Node-RED у вигляді потокової структури (flow), що відповідає функціональній блок-схемі системи. Математична модель об'єкта керування реалізована у середовищі MATLAB Simulink.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтеграція між програмними компонентами здійснюється за допомогою протоколу MQTT, що забезпечує двосторонній обмін даними у реальному часі.

Інтеграція середовищ Node-RED та MATLAB Simulink реалізована за принципом розподіленої кіберфізичної системи, в якій:

- Simulink виконує функцію математичної моделі об'єкта (цифровий двійник гідропонної ферми);
- Node-RED забезпечує реалізацію алгоритмів керування, диспетчеризацію та візуалізацію;
- обмін даними здійснюється за допомогою протоколу MQTT.

Такий підхід дозволяє відокремити модель об'єкта від алгоритмів керування та забезпечити масштабованість системи.

Загальна характеристика платформи

Node-RED — це середовище потокового програмування, побудоване на платформі Node.js, яке дозволяє реалізовувати алгоритми керування у вигляді графічних блоків (flows).

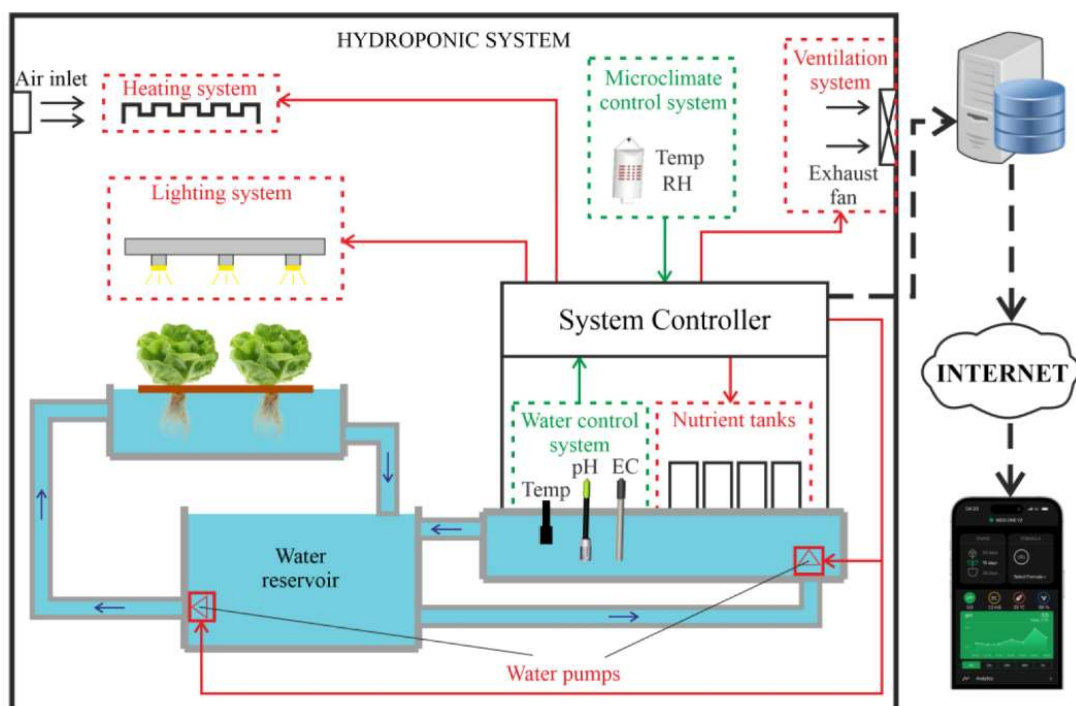


Рисунок 2.14 - Графічна блок-схема

Основні переваги: візуальне програмування, швидка інтеграція з IoT-пристроями, підтримка протоколів (MQTT, HTTP, Modbus), можливість

створення веб-інтерфейсу (Dashboard).

2.3.2 Структура потокової моделі Node-RED

Алгоритм керування гідропонною системою реалізовано у середовищі Node-RED у вигляді потокової моделі (flow), що відповідає структурній блок-схемі системи.

Потокова модель складається з трьох основних частин: блоку збору даних, блоку обробки та блоку формування керуючих впливів. Контур клімату реалізовано як багатоканальну систему з чотирма незалежними каналами.

Інформаційна взаємодія між компонентами організована за принципом «publish/subscribe».

Блок збору даних (Input Layer) Simulink → Node-RED (виміряні змінні).

Реалізований вузлами типу MQTT Input, які приймають дані з моделі:

- температура (sim/temp);
- вологість (sim/humidity);
- концентрація CO₂ (sim/co2);
- освітленість (sim/light);
- pH (sim/ph);
- електропровідність (sim/ec).

Блок обробки (Control Layer)

Містить функціональні вузли (Function), що реалізують алгоритми керування.

Контур клімату представлений чотирма незалежними каналами:

- регулювання температури;
- регулювання вологості;
- регулювання CO₂;
- керування освітленням.

Контур живлення включає:

- регулювання pH;
- регулювання ЕС.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Алгоритми реалізовані за принципом порогового керування з гістерезисом (deadband).

Блок формування керуючих впливів (Output Layer)

Реалізований вузлами MQTT Output, що передають команди Node-RED
→ Simulink (керуючі дії):

- sim/control/climate;
- sim/control/ph;
- sim/control/ec.

Обмін відбувається через MQTT-брокер (локальний або мережевий), що забезпечує асинхронність і слабку зв'язаність компонентів.

Реалізація з боку Simulink. У середовищі MATLAB Simulink модель побудована як багатоканальна система з двома основними підсистемами:

Контур клімату (MIMO).

Модель включає чотири канали:

- температура
- вологість
- CO₂
- освітлення

Кожен канал представлено аперіодичною ланкою першого порядку, що описує інерційні властивості середовища. Вхідними сигналами є керуючі дії від Node-RED, а виходами - значення параметрів середовища.

Контур живлення моделює динаміку:

- pH
- EC

Характеризується інтегруючою поведінкою, що відображає накопичувальний ефект внесення реагентів.

Інтерфейс MQTT. Для взаємодії з зовнішнім середовищем використовуються блоки:

- MQTT Publish - передача змодельованих параметрів
- MQTT Subscribe - прийом керуючих сигналів

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отримані команди декодуються та подаються на відповідні входи підсистем.

Реалізація з боку Node-RED

У середовищі Node-RED алгоритм керування реалізовано у вигляді потоків (flows), що відповідають окремим контурам.

Потік обробки даних. Вхідні дані з MQTT:

- перетворюються до числового формату;
- проходять базову фільтрацію;
- передаються до логічних вузлів керування.

Контур клімату. Реалізовано чотири незалежні підканали:

- регулювання температури (обігрів/охолодження);
- регулювання вологості (зволоження/осушення);
- підтримка рівня CO₂;
- керування освітленням.

Керування здійснюється за принципом порогової логіки (deadband), що забезпечує стійкість і простоту реалізації.

Контур живлення. Передбачено регулювання рН шляхом дозування кислоти/лугу, підтримка ЕС через додавання поживних речовин.

Формування керуючих впливів. Результати логічної обробки кодуються у вигляді команд, передаються через MQTT у відповідні теми, використовуються Simulink-моделлю як вхідні сигнали.

Синхронізація та часові аспекти. Система працює у квазінеперервному режимі:

- Simulink виконує моделювання з фіксованим кроком інтегрування;
- Node-RED обробляє повідомлення подієво;
- синхронізація забезпечується частотою публікації MQTT (типово 1–5 с).

Затримки передачі є незначними та не впливають на стійкість системи через інерційність об'єкта.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ</i>	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

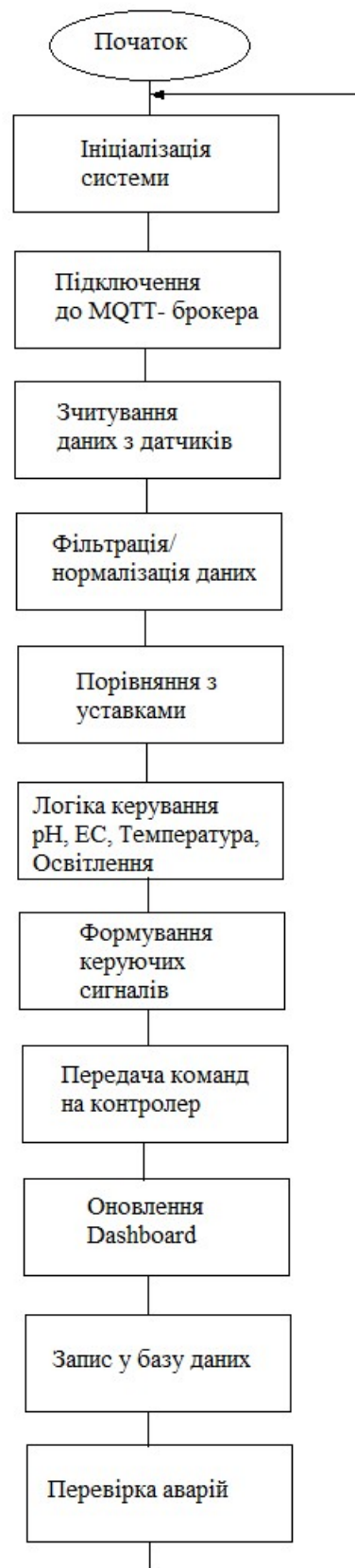


Рисунок 2.15 - Загальний алгоритм роботи системи

Особливості реалізації багатоканальної системи.

Контур клімату реалізовано як декомпозовану МІМО-систему, в якій кожен канал має власний регулятор; відсутні явні перехресні зв'язки на рівні керування; взаємний вплив враховується на рівні моделі Simulink. Такий підхід спрощує синтез системи керування та забезпечує модульність.

Розроблений flow взаємодіє з математичною моделлю, реалізованою у середовищі Simulink. Обмін даними здійснюється через MQTT-протокол, що дозволяє реалізувати концепцію цифрового двійника. Для практичної реалізації сформовано JSON-опис потокової моделі, який імпортується у середовище Node-RED. JSON-структура визначає всі вузли, їх зв'язки та параметри функціонування.

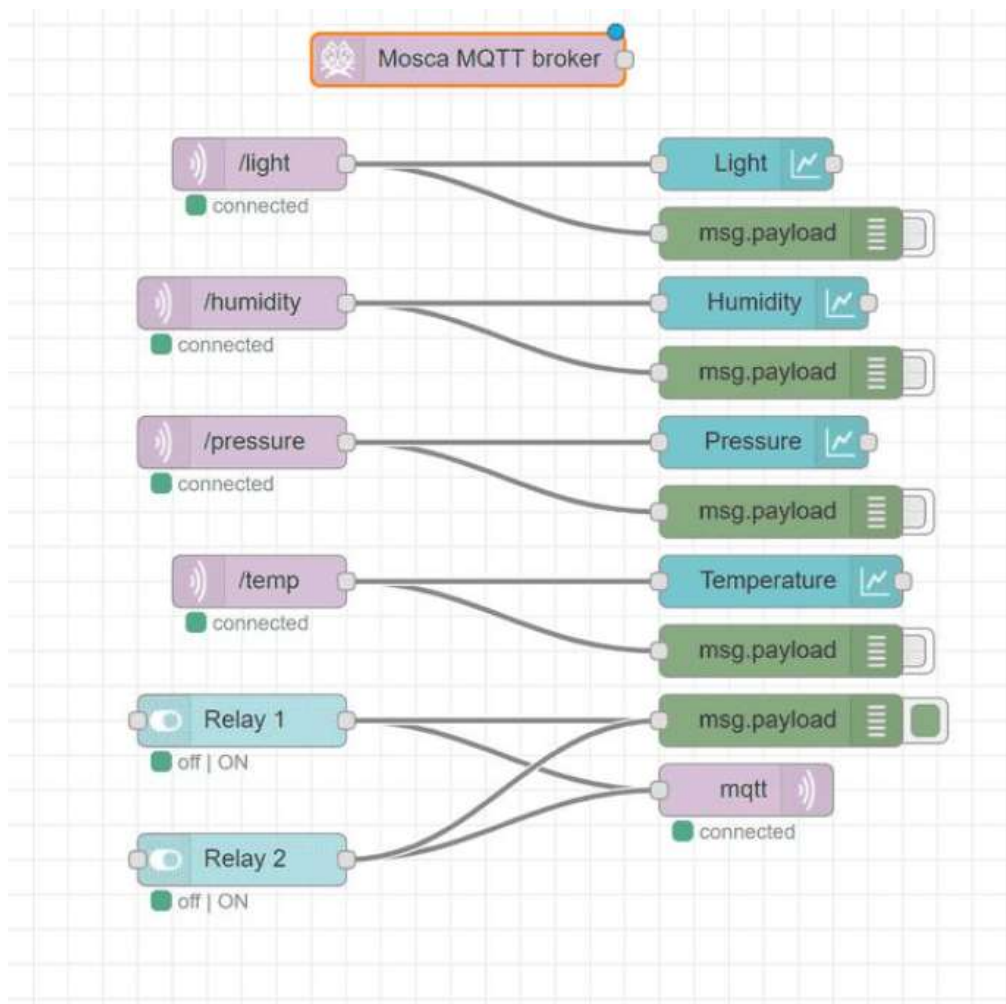


Рисунок 2.16 - Графічна блок-схема алгоритму реалізована безпосередньо у середовищі Node-RED у вигляді потокової структури (flow)

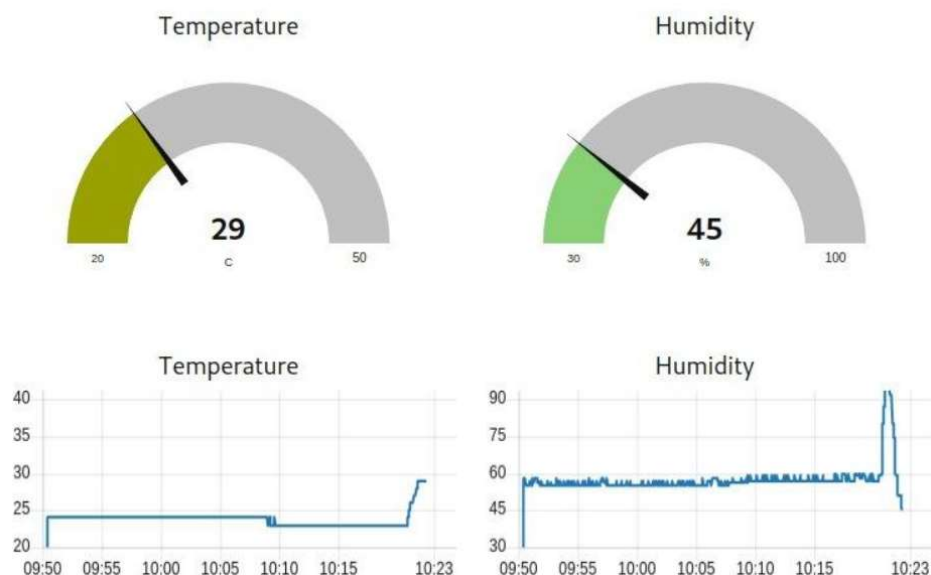


Рисунок 2.17 Реалізація інтерфейсу оператора

Скрипт JSON FLOW (розширений клімат) Додаток Д.

Інтеграція з моделлю Simulink. Математична модель гідропонної системи реалізована у MATLAB Simulink як багатоканальна система, що включає:

- контур клімату (температура, вологість, CO₂, освітлення);
- контур живлення (pH, EC).

Обмін даними між середовищами здійснюється через MQTT-брокер за принципом publish/subscribe.

Передача даних з Simulink до Node-RED:

- формування вимірних параметрів;
- публікація у відповідні MQTT-топіки.

Передача керуючих впливів:

- Node-RED генерує команди;
- Simulink приймає їх через блоки MQTT Subscribe;
- команди подаються на входи математичної моделі.

Взаємозв'язок між елементами системи встановлюється за принципом функціональної відповідності. Вузли MQTT Input відповідають блокам MQTT Publish у Simulink. Функціональні вузли Node-RED відповідають регуляторам, а вузли MQTT Output відповідають блокам MQTT Subscribe.

Таким чином забезпечується узгодженість інформаційних потоків та структурна цілісність системи.

Контур клімату реалізовано як декомпозовану багатовимірну систему, у якій кожен канал регулюється окремо. Взаємний вплив параметрів враховується на рівні моделі у MATLAB Simulink.

Такий підхід дозволяє спростити алгоритми керування, підвищити модульність системи та забезпечити гнучкість налаштування.

У результаті виконано реалізацію алгоритму автоматичного керування гідропонною фермою на базі Node-RED з інтеграцією математичної моделі у MATLAB Simulink.

Інтеграція Simulink з MQTT-протоколом реалізована із використанням MATLAB-функцій, що виконують роль комунікаційного шлюзу. Передача даних здійснюється за допомогою об'єкта `mqttclient`, який забезпечує публікацію та підписку на відповідні топіки.

Для реалізації інтеграції було розроблено автоматизований MATLAB-скрипт, який створює модель Simulink, забезпечує MQTT-взаємодію та виконує ітераційне моделювання з обміном даними у реальному часі (Додаток Є).

Запропоноване рішення забезпечує: багатоканальне керування параметрами клімату та живлення; розподілену архітектуру системи; можливість моделювання у режимі цифрового двійника; гнучкість та масштабованість.

Отримана система може бути використана як для дослідницьких задач, так і для подальшої реалізації у реальних автоматизованих гідропонних установках

Висновки до розділу:

У другому розділі роботи розроблено структуру системи автоматичного керування гідропонною фермою та побудовано математичні моделі основних технологічних контурів. Виконано декомпозицію системи на контур клімату та контур живлення, визначено датчики, виконавчі механізми та параметри

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

керування. Для основних каналів регулювання сформовано математичні моделі у вигляді інерційних ланок, а також враховано зовнішні збурення, міжконтурні зв'язки та біологічні процеси, що відбуваються у рослинах.

Реалізовано імітаційну модель системи у середовищі MATLAB Simulink та розроблено алгоритми керування у Node-RED із використанням MQTT-протоколу для обміну даними у реальному часі. Проведено моделювання перехідних процесів, досліджено вплив збурень, міжконтурних зв'язків і блоку Plant Activity на динаміку системи. Отримані результати підтвердили працездатність моделі, стійкість системи керування та можливість використання розробленої моделі як цифрового двійника гідропонної ферми.

					КНУ КРБ.174.26.05.02.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено систему автоматичного керування гідропонною фермою на основі інтеграції середовищ MATLAB Simulink та Node-RED. Запропоновано багатоканальну структуру керування, що включає контур клімату (температура, вологість, концентрація CO₂, освітленість) та контур живлення (рН і електропровідність), реалізовану відповідно до трирівневої архітектури з декомпозицією A0 → A1 (клімат) та A2 (живлення).

Математичну модель об'єкта реалізовано у Simulink у вигляді системи з розподіленими параметрами, що відображає інерційні та інтегруючі властивості гідропонного середовища. У моделі враховано зовнішні збурення, міжконтурні зв'язки та вплив біологічних процесів рослин, зокрема фотосинтезу, транспірації, споживання поживних речовин і газообміну.

Алгоритми керування реалізовано у Node-RED у вигляді потокової структури з використанням логіки порогового регулювання, що забезпечує гнучкість налаштування та адаптацію до змінних умов середовища. Інтеграцію між компонентами здійснено за допомогою протоколу MQTT, що забезпечує двосторонній обмін даними у режимі реального часу між імітаційною моделлю та рівнем прикладної логіки керування. Отримана система реалізує концепцію цифрового двійника гідропонної ферми.

У процесі дослідження виконано моделювання перехідних процесів та аналіз якості регулювання для різних режимів роботи системи. Встановлено, що врахування біологічних процесів і взаємних впливів між контурами суттєво змінює динаміку системи, збільшуючи час встановлення та ускладнюючи характер перехідних процесів. Отримані результати підтверджують ефективність застосування регуляторів типу PID за умови коректного налаштування їх параметрів.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВИСНОВКИ</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Капітон Д.В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Курганов І.Д.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затвердив</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Автоматизація замкнених систем вирощування рослин // Технічні науки та технології. – 2023. – № 2. – С. 90–98.

2. Автоматизація технологічних процесів у тепличному господарстві // Матеріали наук.-практ. конф. – Суми : СНАУ, 2024. – С. 112–118.

3. Автоматизована система керування гідропонної теплиці : бакалаврська робота. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 75 с.

4. Гідропонні технології вирощування рослин у контрольованому середовищі : навч. посіб. – Хмельницький : ХНУ, 2022. – 156 с.

5. Інтелектуальні системи керування агротехнологічними об’єктами : монографія. – Харків : ХНТУСГ, 2023. – 198 с.

6. Комп’ютерно-інтегровані системи керування тепличними комплексами : монографія / за ред. О. П. Коваленка. – Київ : НУБіП України, 2024. – 210 с.

7. Литвиненко Р., Міхєєнко В. Перспективи використання гідропонних технологій у сучасному рослинництві // Вісник аграрної науки. – 2023. – № 4. – С. 45–52.

8. Методи регулювання параметрів мікроклімату теплиць : навч. посіб. – Львів : ЛНАУ, 2021. – 134 с.

9. Труш Г. В. Автоматизація процесу регулювання поживного розчину у гідропонній системі : кваліфікаційна робота бакалавра. – Київ : НУБіП України, 2025. – 78 с.

10. Ямчук А. В. Система автоматичного керування мікрокліматом теплиці : кваліфікаційна робота бакалавра. – Київ : НУБіП України, 2024. – 82 с.

11. Akhinov I. Hydroponic system with integrator modified PI controller for nutrient regulation // TEPIAN. – 2024. – Vol. 5(2). – P. 55–63.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ		
Розроб.		Капітон Д.В.					
Перевір.		Курганов І.Д.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затвердив		Маринич І.А.			КНУ АКІТР-23ск		

12. AI-based greenhouse optimization [Electronic resource]. – 2022. – Available at: <https://arxiv.org> – Accessed: 20.02.2026.

13. Åström K. J., Murray R. M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. – Princeton : Princeton University Press, 2008. – 408 p.

14. Bayesian optimization for PID tuning [Electronic resource]. – 2019. – Available at: <https://arxiv.org> – Accessed: 20.02.2026.

15. Cloud-based hydroponic monitoring system // Journal of Smart Agriculture. – 2023. – Vol. 4(1). – P. 33–41.

16. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. – Boston : Pearson, 2017. – 1024 p.

17. Fuzzy-PID control for nutrient solution temperature // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15(10). – Article 5381.

18. Greenhouse temperature control using PID controller // Journal of Agricultural Engineering. – 2021. – Vol. 52(3). – P. 45–53.

19. IGrow autonomous greenhouse control system [Electronic resource]. – 2021. – Available at: <https://arxiv.org> – Accessed: 20.02.2026.

20. IoT Smart Greenhouse for Hydroponic Gardens [Electronic resource]. – 2023. – Available at: <https://arxiv.org> – Accessed: 20.02.2026.

21. Li M. et al. Optimal control algorithm of fertigation system based on EC model // International Journal of Agricultural and Biological Engineering. – 2022. – Vol. 15(4). – P. 120–128.

22. MATLAB Control System Toolbox : User's Guide. – Natick : The MathWorks Inc., 2023. – 1450 p.

23. Ogata K. Modern Control Engineering. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2010. – 894 p.

24. PID controller design and tuning methods review // ISA Transactions. – 2022. – Vol. 120. – P. 1–15.

25. Rathedi M. et al. Performance evaluation of hydroponics control systems for pH, temperature and water level control // Int. J. Engineering Research in Africa. – 2023. – Vol. 65. – P. 105–114.

					<i>KHY KPB.174.26.05.00.II3</i>	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26. Seborg D. E. Process Dynamics and Control. – Hoboken : Wiley, 2011. – 600 p.
27. Simulink : User's Guide. – Natick : The MathWorks Inc., 2023. – 1600 p.
28. Smart modular greenhouse control via PSO-PID // Computers and Electronics in Agriculture. – 2025. – Vol. 210. – Article 108045.
29. Wahyuni S. Hydroponic NFT agricultural monitoring: Temperature control based on PID // BIO Web of Conferences. – 2024. – Vol. 68. – Article 03012.
30. Ziegler J. G., Nichols N. B. Optimum settings for automatic controllers // Transactions of the ASME. – 1942. – Vol. 64. – P. 759–76
31. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.
32. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
33. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
34. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)
35. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

Перехідні процеси двоконтурної системи керування без урахування
збурень та міжконтурних зв'язків

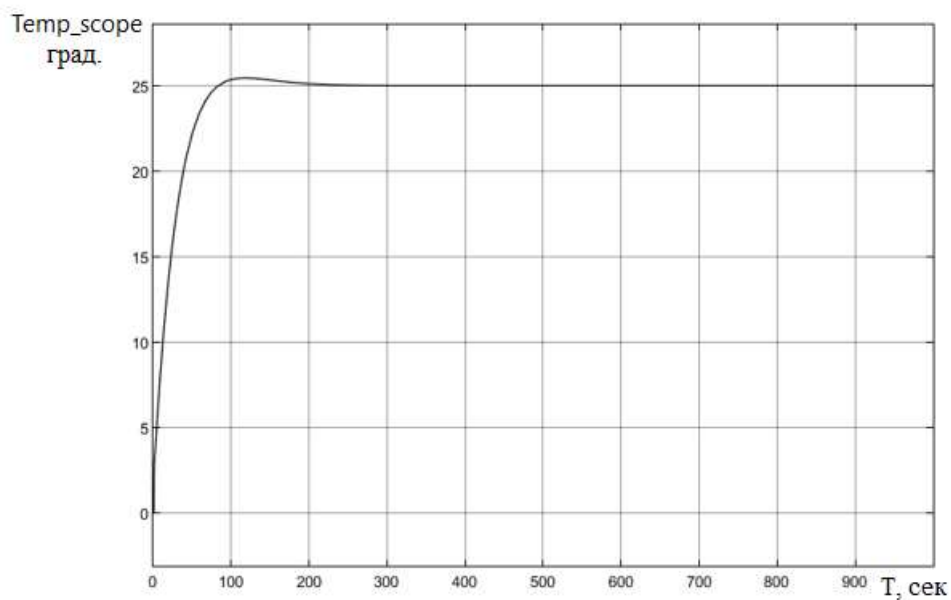


Рисунок А.1 - Перехідний процес зміни температури

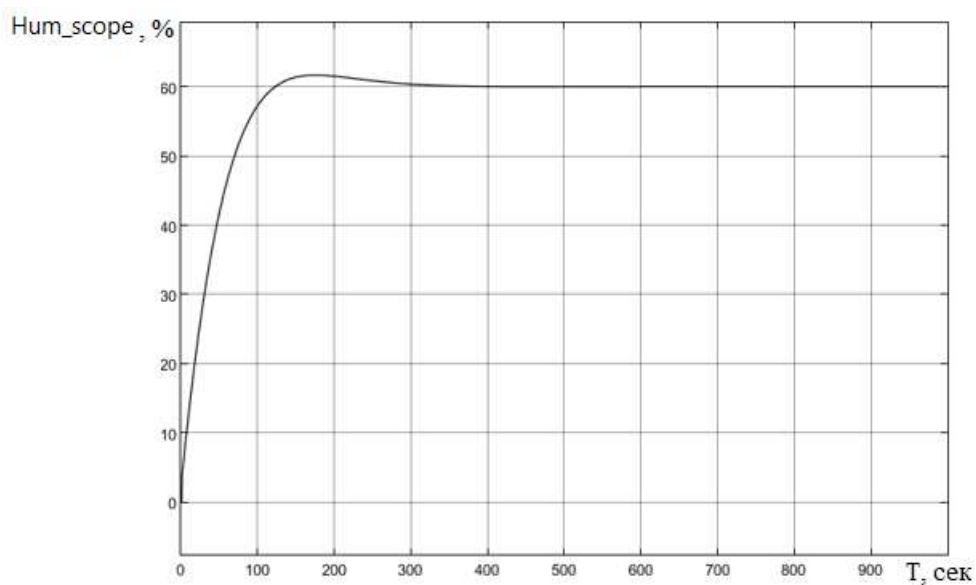


Рисунок А.2 - Перехідний процес зміни вологості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

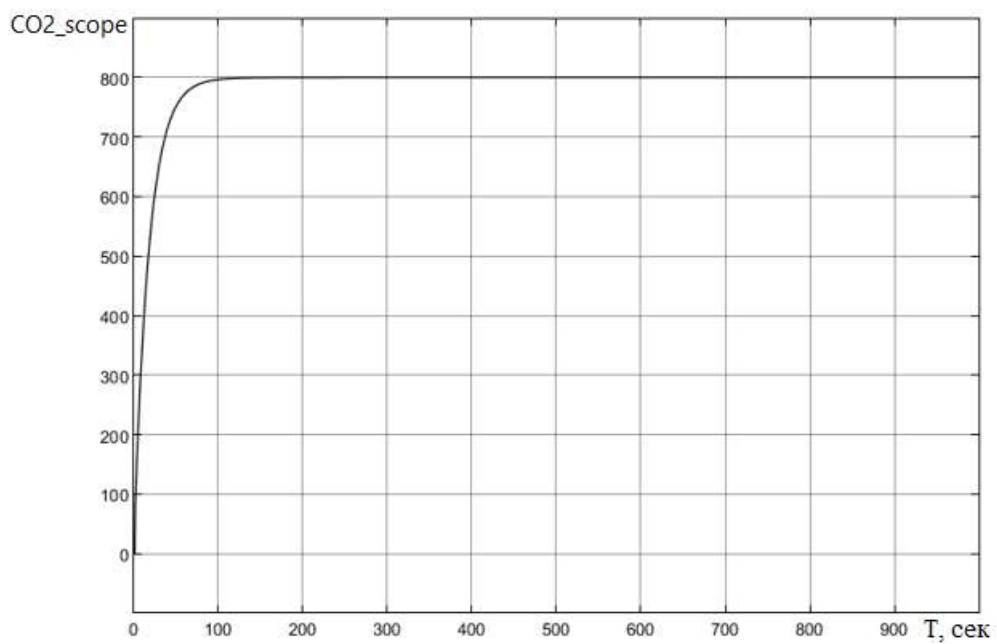


Рисунок А.3 - Перехідний процес зміни насичення вуглекислого газу

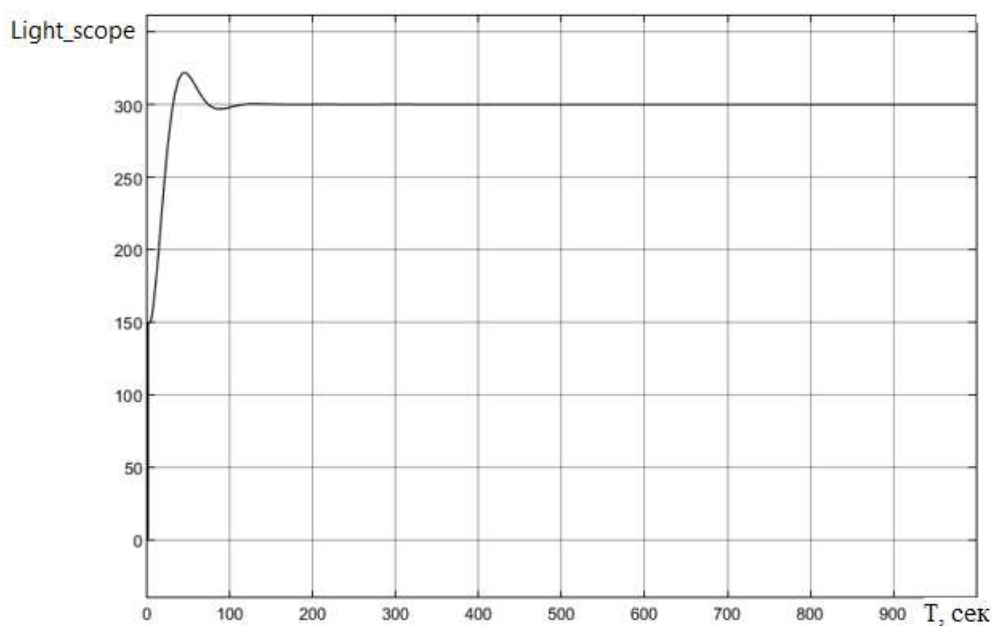


Рисунок А.4 - Перехідний процес коливань внутрішнього штучного освітлення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ

Арк.

75

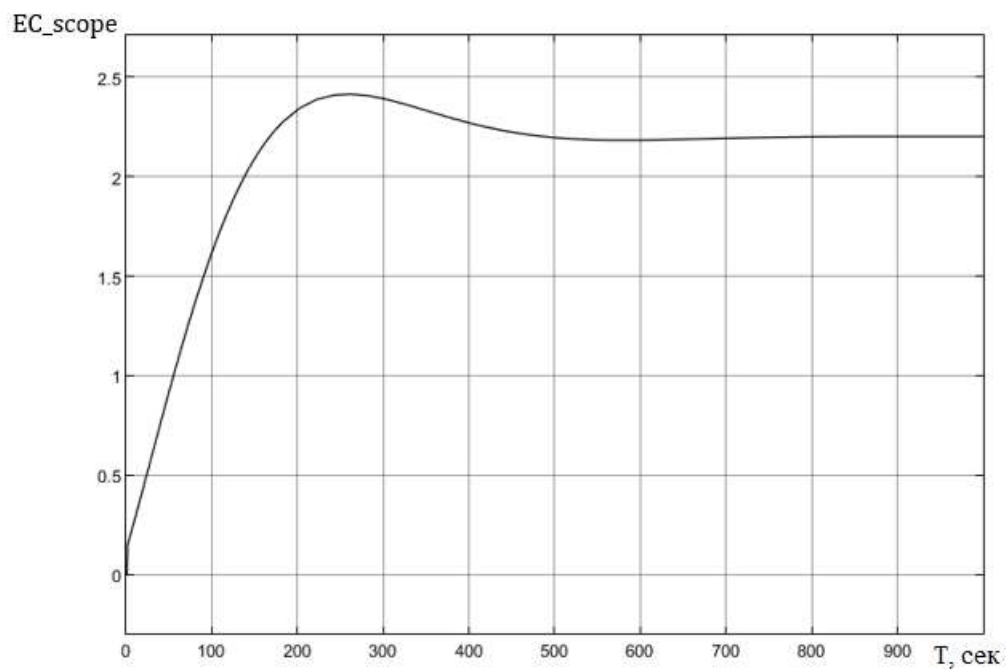


Рисунок А.5 - Перехідний процес зміни електропровідності
в живильному розчині

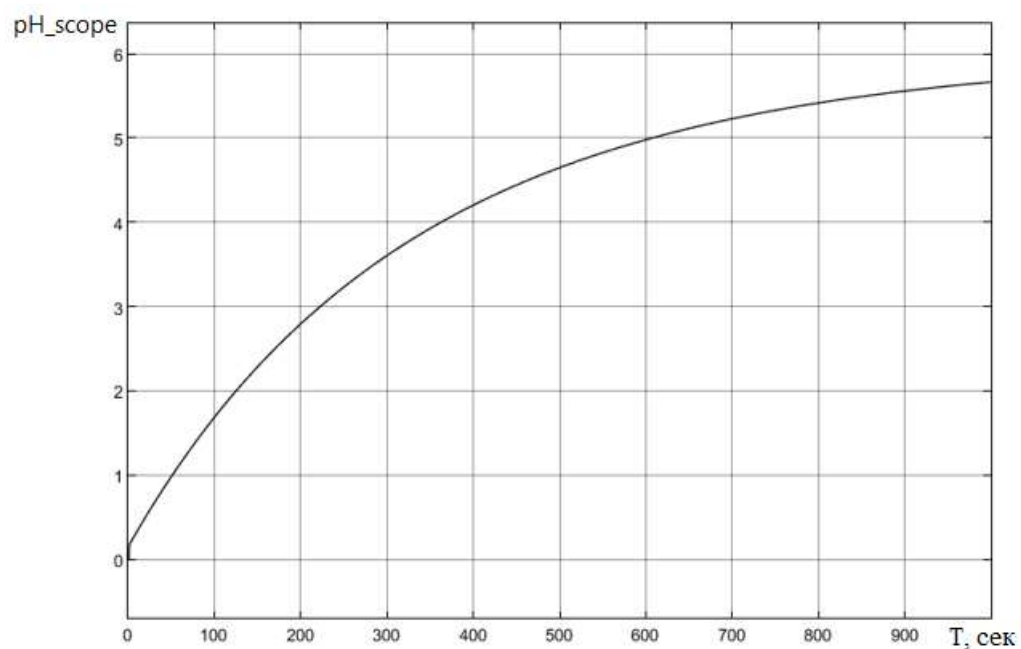


Рисунок А.6 - Перехідний процес зміни лужності – кислотності
в живильному розчині

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ

Арк.

76

Перехідні процеси двоконтурної системи керування без урахування збурень та міжконтурних зв'язків з коригованими параметрами

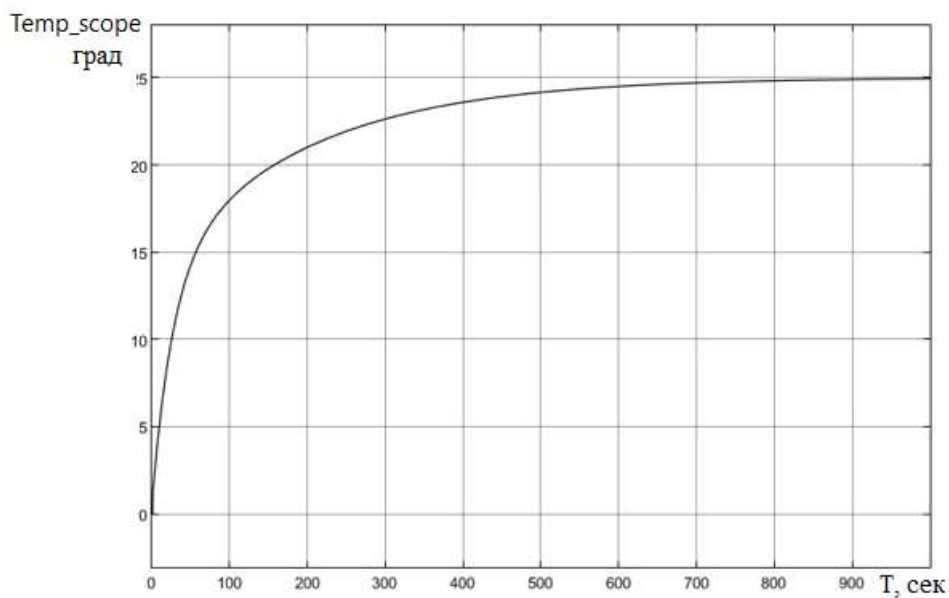


Рисунок Б.1 - Перехідний процес зміни температури

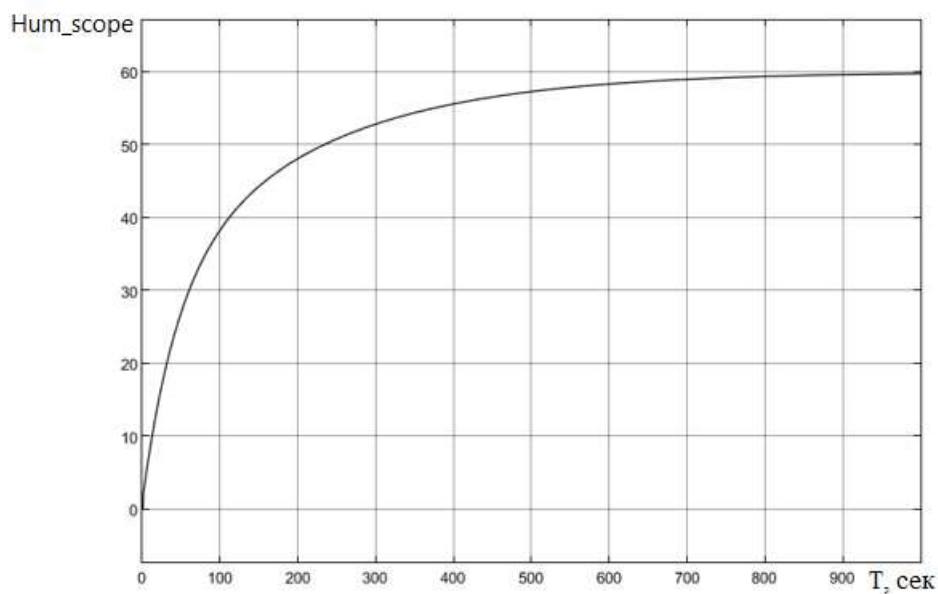


Рисунок Б.2 - Перехідний процес зміни вологості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

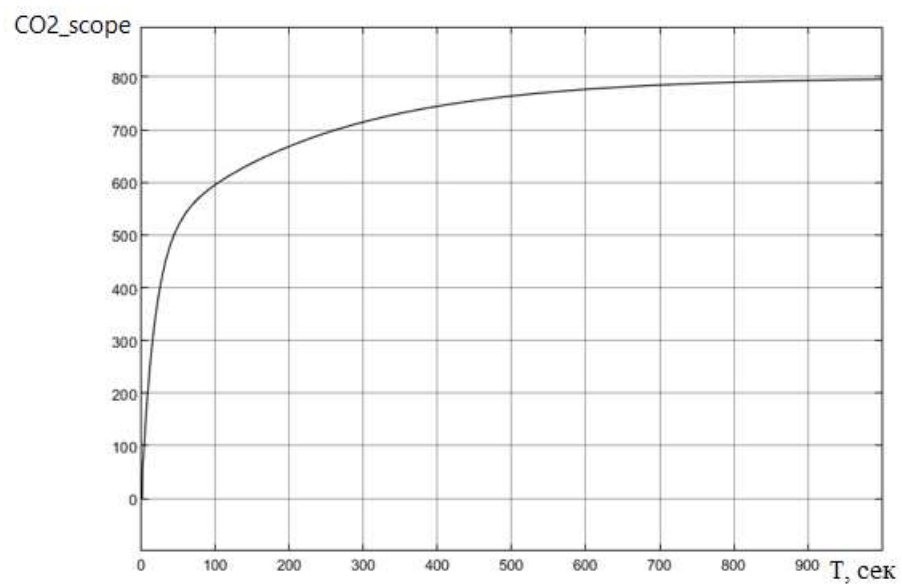


Рисунок Б.3 - Перехідний процес зміни насичення вуглекислого газу

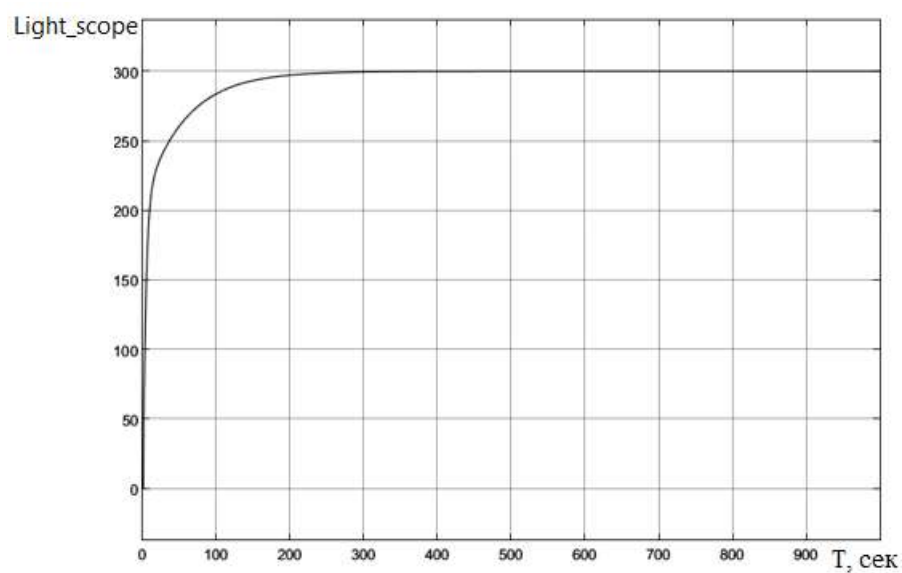


Рисунок Б.4 - Перехідний процес внутрішнього штучного освітлення

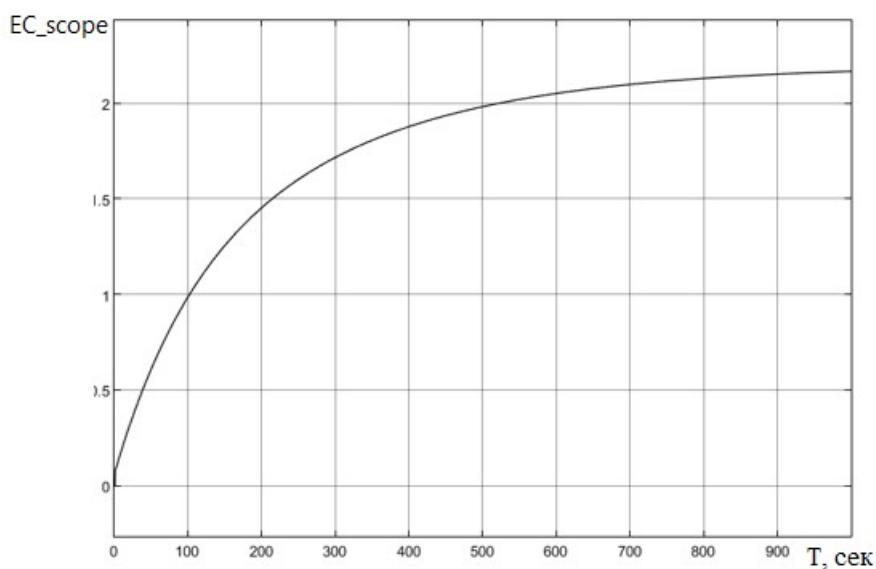


Рисунок Б.5 - Перехідний процес зміни електропровідності
в живильному розчині

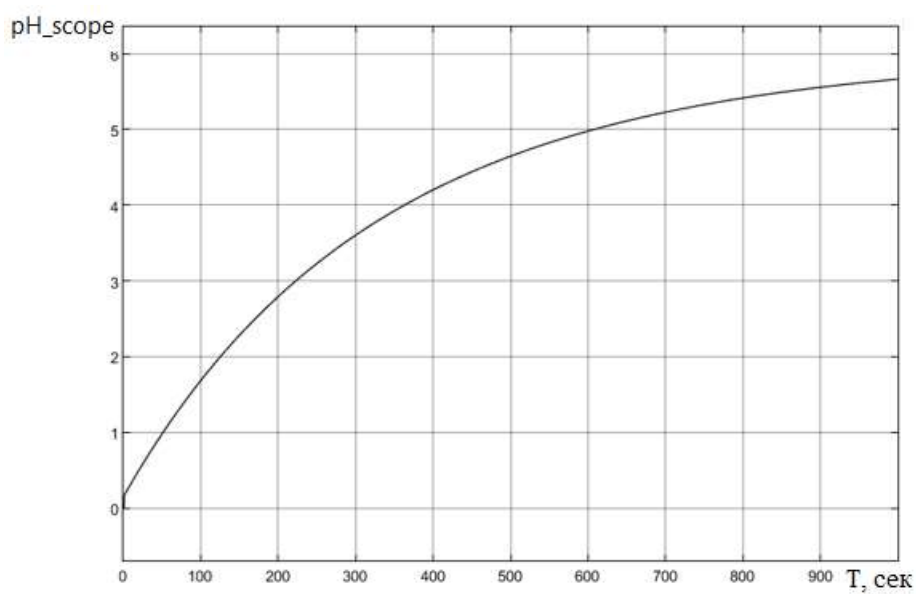


Рисунок Б.6 - Перехідний процес зміни лужності – кислотності
в живильному розчині

Перехідні процеси двоконтурної системи керування з урахування
збурень та міжконтурних зв'язків

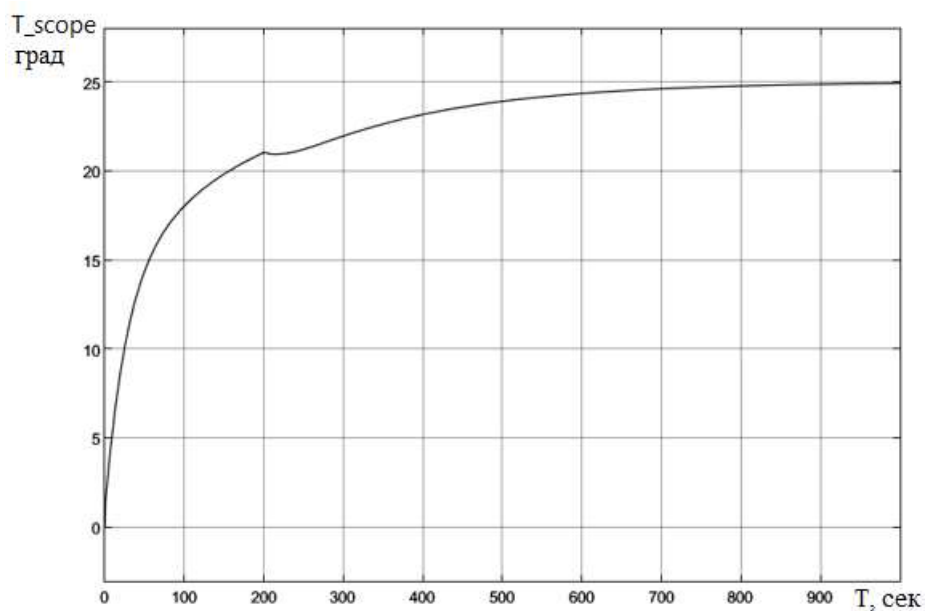


Рисунок В.1 - Перехідний процес зміни температури

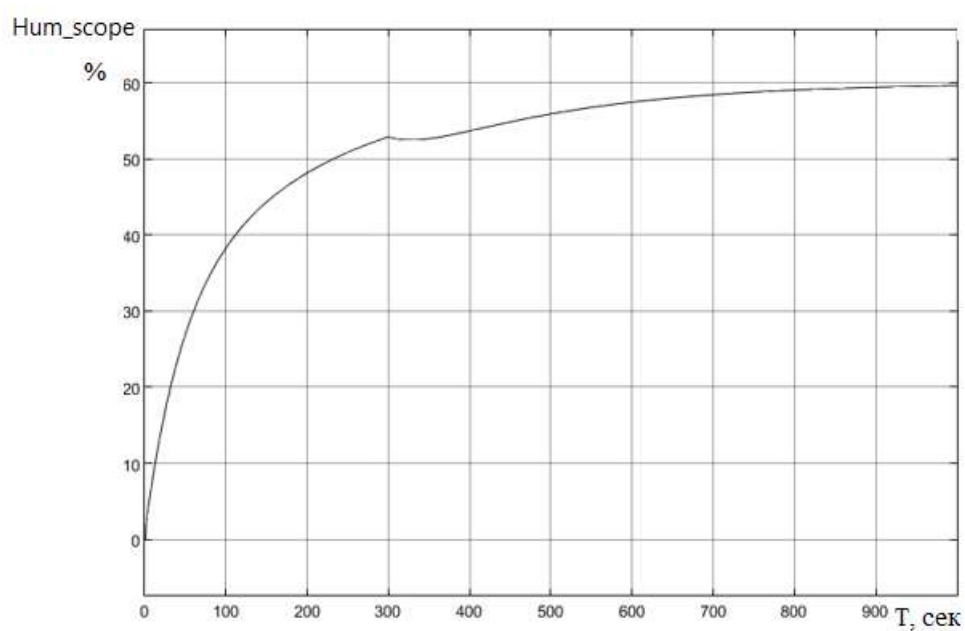


Рисунок В.2 - Перехідний процес зміни вологості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

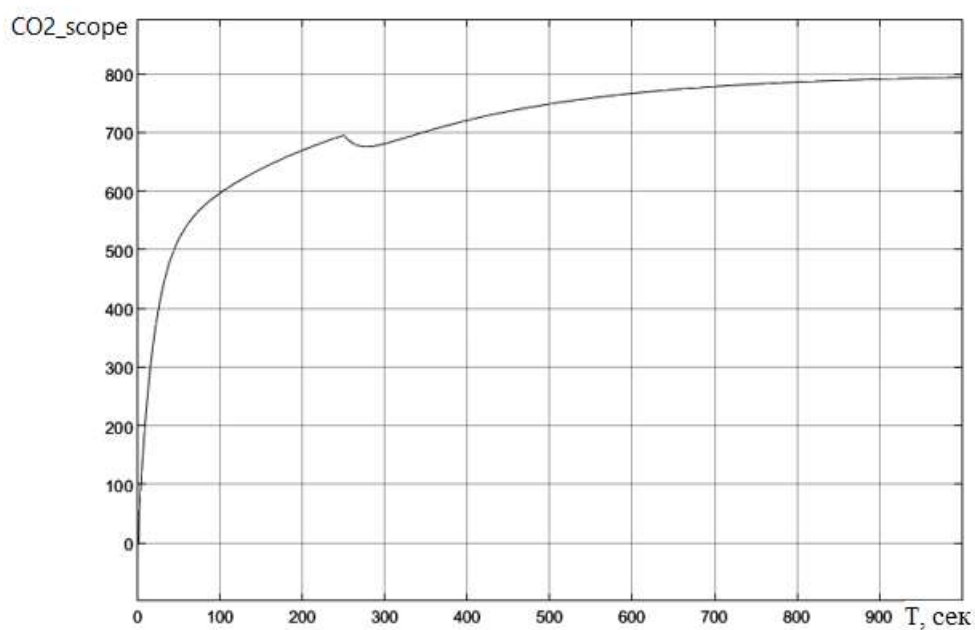


Рисунок В.3 - Перехідний процес зміни насичення вуглекислого газу під впливом збурень

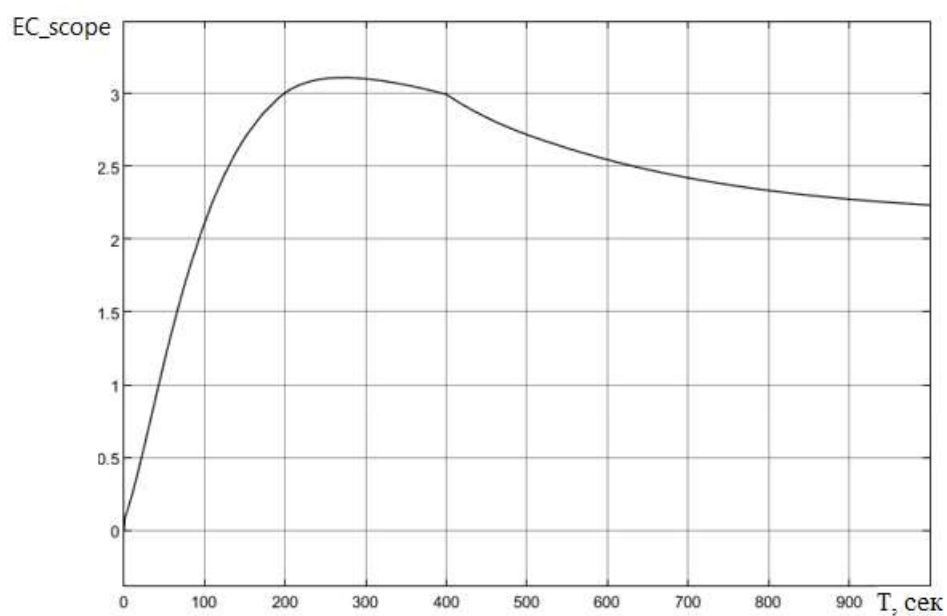


Рисунок В.4 - Перехідний процес зміни електропровідності в живильному розчині під впливом зміни температури

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ

Арк.

81

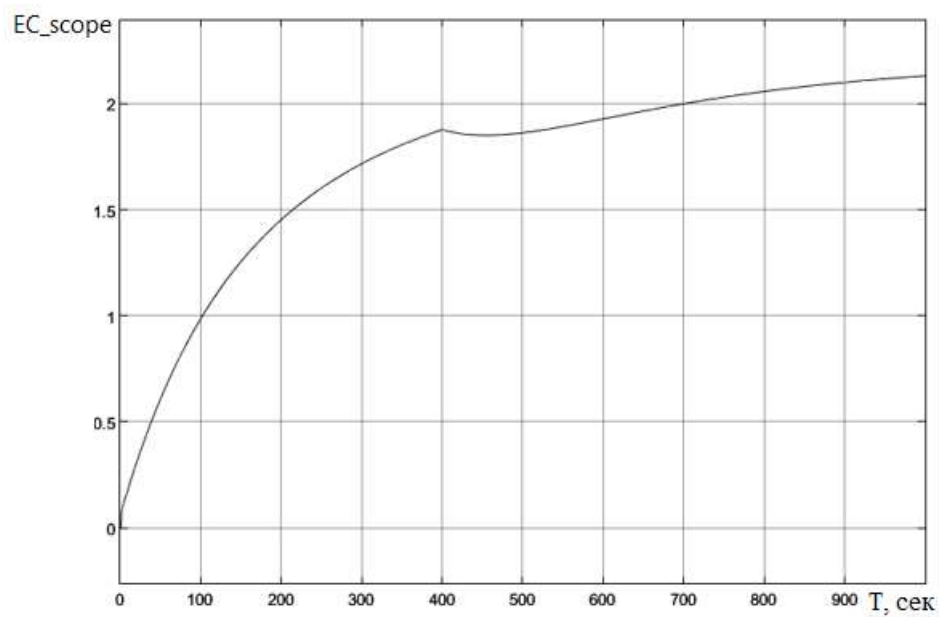


Рисунок В.5 - Перехідний процес зміни електропровідності в живильному розчині під впливом зміни температури та лужності

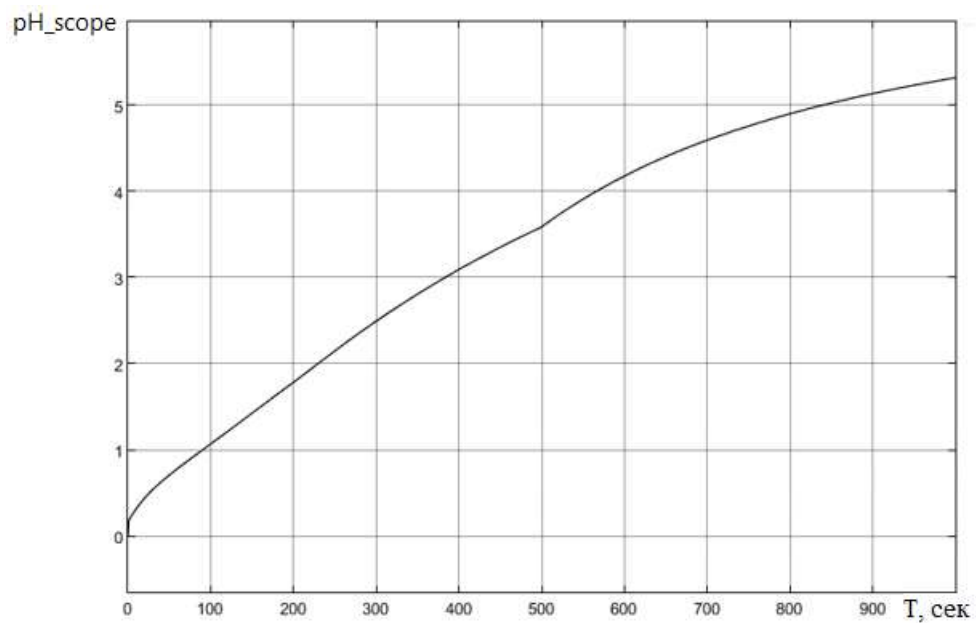


Рисунок В.6 - Перехідний процес зміни лужності в живильному розчині під впливом зміни температури

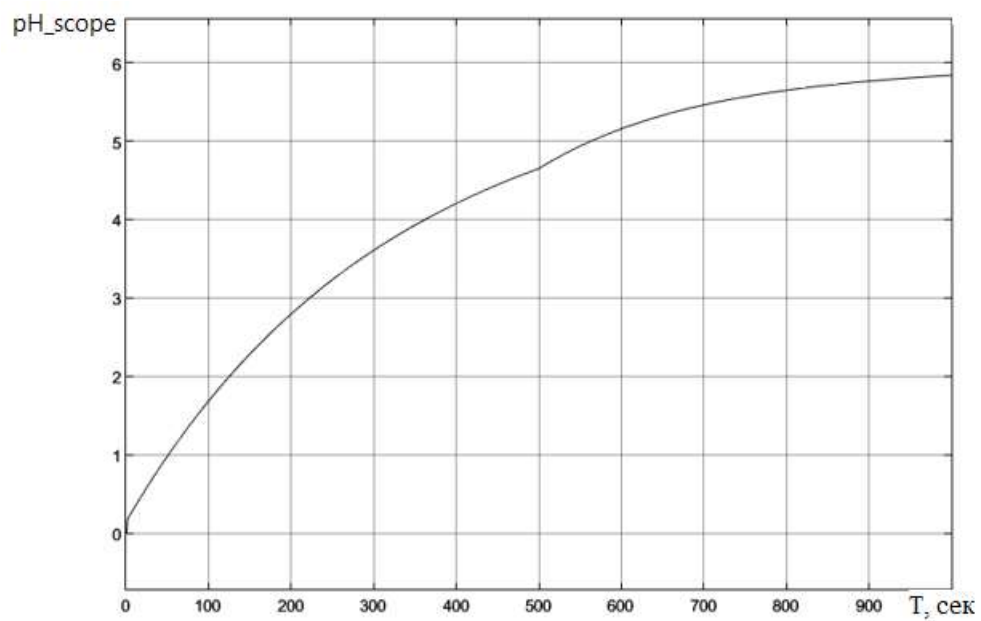


Рисунок В.7 - Перехідний процес зміни лужності
в живильному розчині під впливом зміни електропровідності

Перехідні процеси двоконтурної системи керування з моделювання
автоматичної системи гідропоніки з урахуванням зовнішніх збурень,
перехресних зв'язків між контурами клімату та живлення та біологічних
процесів контурів *Plant Activity*

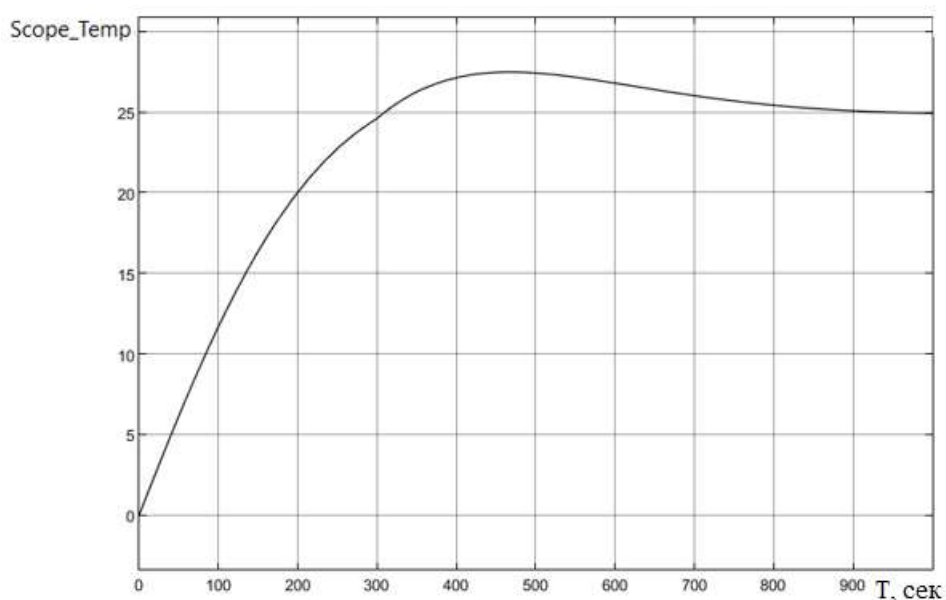


Рисунок Г.1 - Перехідний процес зміни температури

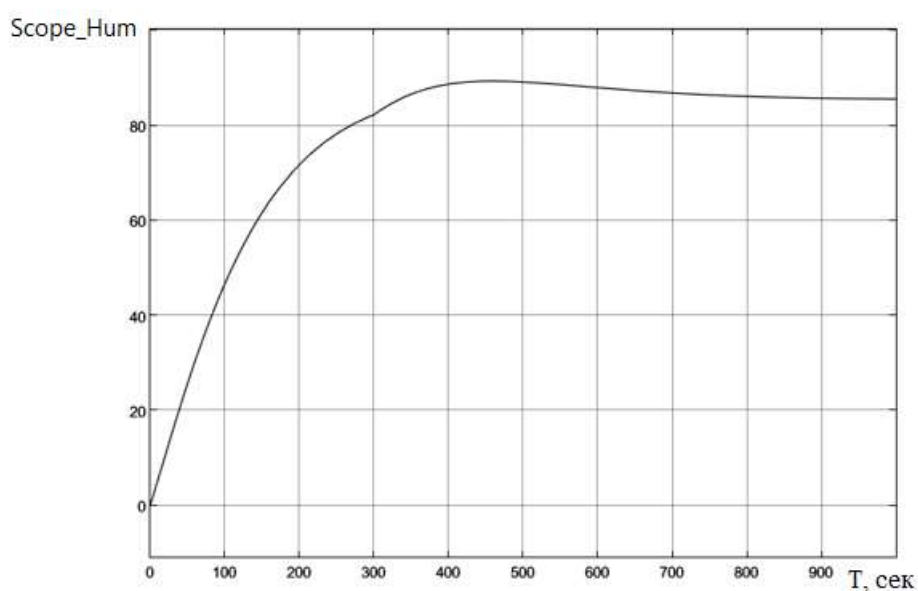


Рисунок Г.2 - Перехідний процес зміни вологості

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

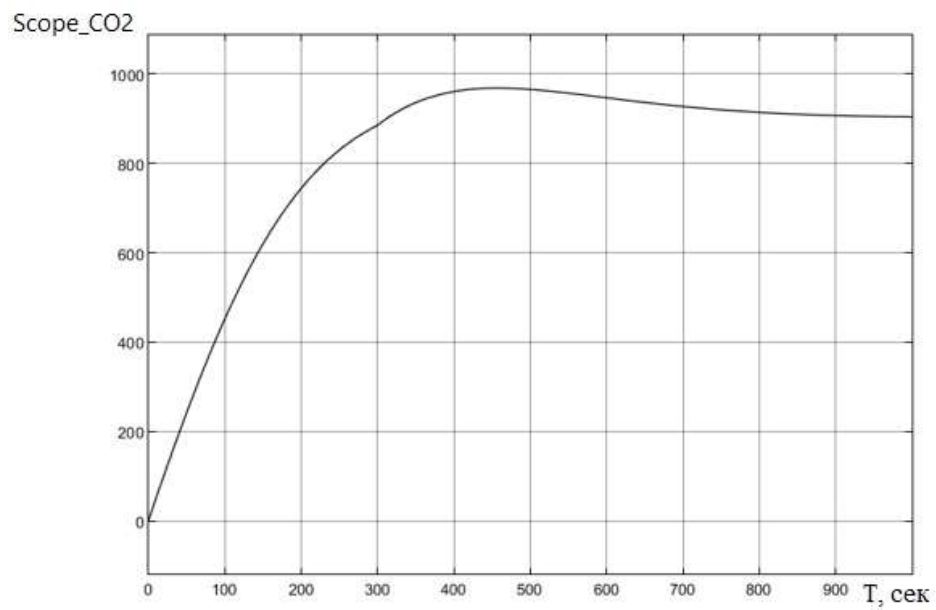


Рисунок Г.3 - Перехідний процес зміни насичення вуглекислого газу

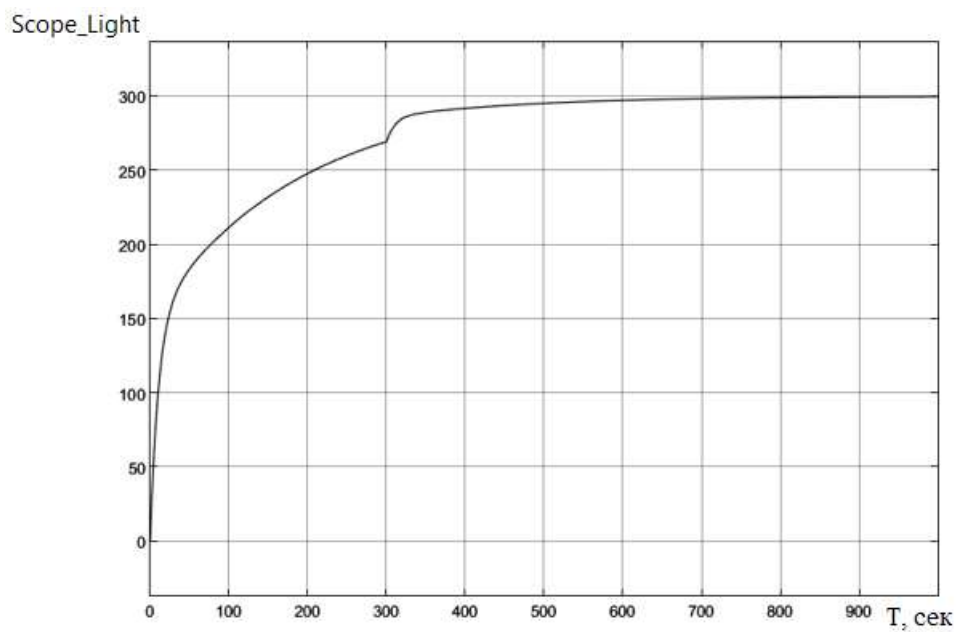


Рисунок Г.4 - Перехідний процес внутрішнього штучного освітлення

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ

Арк.

85

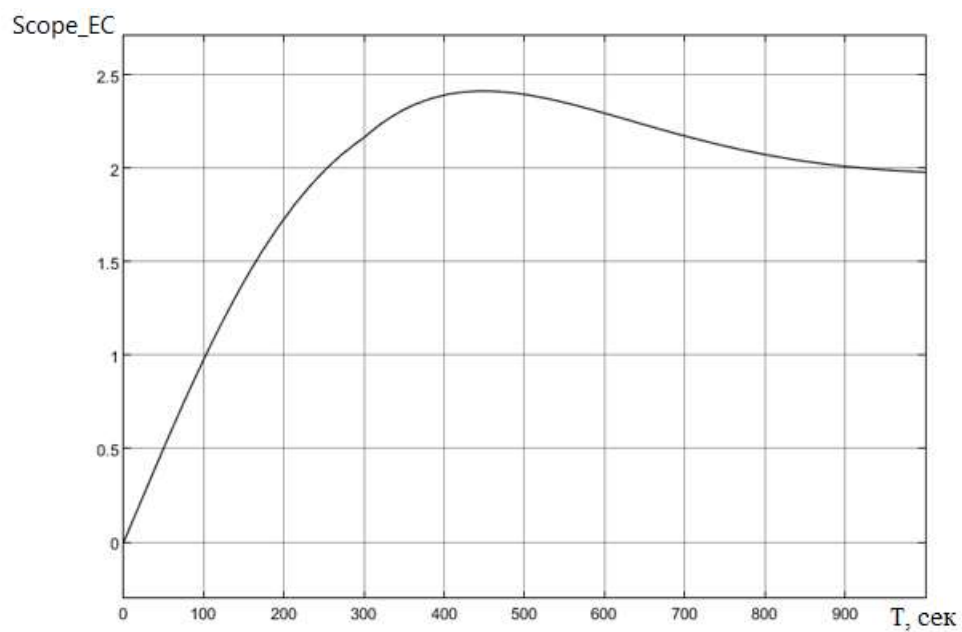


Рисунок Г.5 - Перехідний процес зміни електропровідності
в живильному розчині

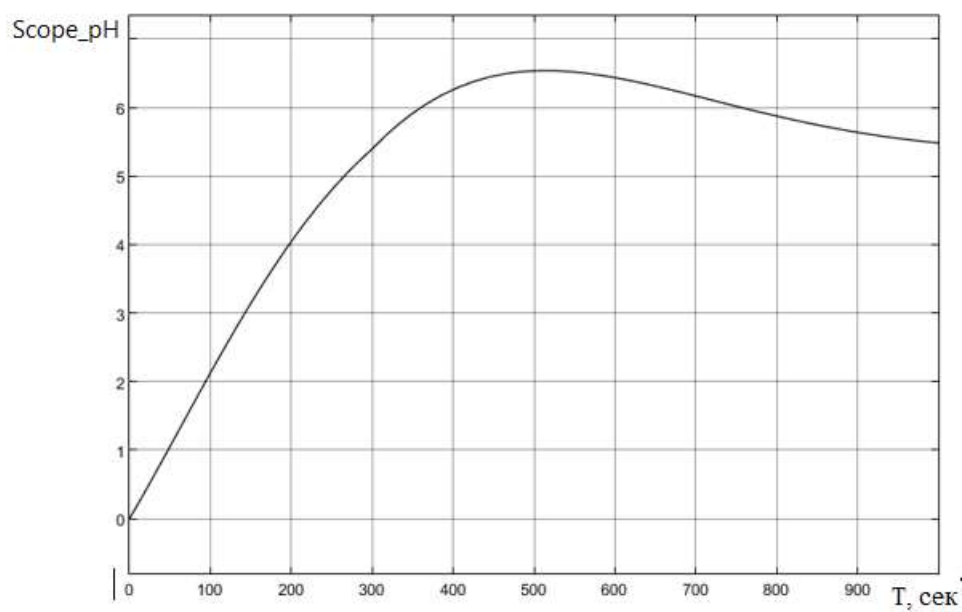


Рисунок Г.6- Перехідний процес зміни лужності
в живильному розчині

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ

Арк.

86

Скрипт JSON FLOW

```
[
  {
    "id": "tab1",
    "type": "tab",
    "label": "Hydroponics MIMO Control"
  },

  // ===== INPUTS =====
  {
    "id": "temp_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "Temperature",
    "topic": "sim/temp",
    "broker": "broker",
    "x": 120,
    "y": 60,
    "wires": [["temp_ctrl"]]
  },
  {
    "id": "hum_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "Humidity",
    "topic": "sim/humidity",
    "broker": "broker",
    "x": 120,
    "y": 120,
    "wires": [["hum_ctrl"]]
  },
  {
    "id": "co2_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "CO2",
    "topic": "sim/co2",
    "broker": "broker",
    "x": 120,
    "y": 180,
    "wires": [["co2_ctrl"]]
  },
  {
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    "id": "light_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "Light",
    "topic": "sim/light",
    "broker": "broker",
    "x": 120,
    "y": 240,
    "wires": [["light_ctrl"]]
  },

  // ===== CLIMATE CONTROL =====
  {
    "id": "temp_ctrl",
    "type": "function",
    "z": "tab1",
    "name": "Temp Control",
    "func": "let t = msg.payload;\nlet set = 24;\nif (t > set+1)
msg.payload='cool';\nelse if (t < set-1) msg.payload='heat';\nelse
msg.payload='off';\nreturn msg;",
    "x": 350,
    "y": 60,
    "wires": [["out_climate"]]
  },
  {
    "id": "hum_ctrl",
    "type": "function",
    "z": "tab1",
    "name": "Humidity Control",
    "func": "let h = msg.payload;\nlet set = 65;\nif (h < set-5)
msg.payload='humidify';\nelse if (h > set+5) msg.payload='dehumidify';\nelse
msg.payload='off';\nreturn msg;",
    "x": 360,
    "y": 120,
    "wires": [["out_climate"]]
  },
  {
    "id": "co2_ctrl",
    "type": "function",
    "z": "tab1",
    "name": "CO2 Control",
    "func": "let c = msg.payload;\nlet set = 800;\nif (c < set)
msg.payload='co2_on';\nelse msg.payload='off';\nreturn msg;",
    "x": 350,
    "y": 180,

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		


```

    "wires": [["out_climate"]]
  },
  {
    "id": "light_ctrl",
    "type": "function",
    "z": "tab1",
    "name": "Light Control",
    "func": "let l = msg.payload;\nlet set = 300;\nif (l < set)
msg.payload='light_on';\nelse msg.payload='off';\nreturn msg;",
    "x": 350,
    "y": 240,
    "wires": [["out_climate"]]
  },

  {
    "id": "out_climate",
    "type": "mqtt out",
    "z": "tab1",
    "name": "Climate Commands",
    "topic": "sim/control/climate",
    "broker": "broker",
    "x": 650,
    "y": 150,
    "wires": []
  },

  // ===== NUTRITION =====
  {
    "id": "ph_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "pH",
    "topic": "sim/ph",
    "broker": "broker",
    "x": 120,
    "y": 320,
    "wires": [["ph_ctrl"]]
  },
  {
    "id": "ec_in",
    "type": "mqtt in",
    "z": "tab1",
    "name": "EC",
    "topic": "sim/ec",
    "broker": "broker",

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

"x": 120,
"y": 380,
"wires": [["ec_ctrl"]]
},

{
  "id": "ph_ctrl",
  "type": "function",
  "z": "tab1",
  "name": "pH Control",
  "func": "let ph = msg.payload;\nlet set = 6.0;\nif (ph > set+0.2)
msg.payload='acid';\nelse if (ph < set-0.2) msg.payload='base';\nelse
msg.payload='off';\nreturn msg;",
  "x": 350,
  "y": 320,
  "wires": [["out_ph"]]
},
{
  "id": "ec_ctrl",
  "type": "function",
  "z": "tab1",
  "name": "EC Control",
  "func": "let ec = msg.payload;\nlet set = 1.8;\nif (ec < set)
msg.payload='nutrients';\nelse msg.payload='off';\nreturn msg;",
  "x": 350,
  "y": 380,
  "wires": [["out_ec"]]
},

{
  "id": "out_ph",
  "type": "mqtt out",
  "z": "tab1",
  "name": "pH Cmd",
  "topic": "sim/control/ph",
  "broker": "broker",
  "x": 650,
  "y": 320,
  "wires": []
},
{
  "id": "out_ec",
  "type": "mqtt out",
  "z": "tab1",
  "name": "EC Cmd",

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						90
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    "topic": "sim/control/ec",
    "broker": "broker",
    "x": 650,
    "y": 380,
    "wires": []
  },

  {
    "id": "broker",
    "type": "mqtt-broker",
    "name": "Local",
    "broker": "localhost",
    "port": "1883"
  }
]

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MATLAB-скрипт, який створює модель Simulink, забезпечує MQTT-
взаємодію

```

%% =====
% HYDROPONICS DIGITAL TWIN (AUTO)
% Simulink + MQTT + Node-RED
% =====

clear; clc;

model = 'hydroponics_full_system';
new_system(model);
open_system(model);

%% =====
% 1. MQTT CLIENT
% =====
disp('Connecting to MQTT broker...');
client = mqttclient("tcp://localhost",1883);

% Глобальні змінні для команд
global climate_cmd ph_cmd ec_cmd
climate_cmd = "off";
ph_cmd = "off";
ec_cmd = "off";

% Callback
client.Callback = @(topic,msg) mqtt_callback(topic,msg);

subscribe(client,"sim/control/#");

%% =====
% 2. SIMULINK MODEL
% =====

% --- INPUTS (керування з Node-RED)
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/Climate Cmd'],'Value','0');
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/pH Cmd'],'Value','0');
add_block('simulink/Sources/Constant',[model '/EC Cmd'],'Value','0');

% --- CLIMATE MODEL (4 канали)
add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Temp TF'],...
'Numerator','1','Denominator','[10 1]');

```

```

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Hum TF'],...
'Numerator','1','Denominator',[15 1]);

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/CO2 TF'],...
'Numerator','1','Denominator',[20 1]);

add_block('simulink/Continuous/Transfer Fcn',[model '/Light TF'],...
'Numerator','1','Denominator',[5 1]);

% --- NUTRITION MODEL
add_block('simulink/Continuous/Integrator',[model '/pH Dynamics']);
add_block('simulink/Continuous/Integrator',[model '/EC Dynamics']);

% --- OUTPUTS
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/Temp_out'],...
'VariableName','temp_out');
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/Hum_out'],...
'VariableName','hum_out');
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/CO2_out'],...
'VariableName','co2_out');
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/Light_out'],...
'VariableName','light_out');
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/pH_out'],...
'VariableName','ph_out');
add_block('simulink/Sinks/To Workspace',[model '/EC_out'],...
'VariableName','ec_out');

% --- CONNECTIONS
add_line(model,'Climate Cmd/1','Temp TF/1');
add_line(model,'Climate Cmd/1','Hum TF/1');
add_line(model,'Climate Cmd/1','CO2 TF/1');
add_line(model,'Climate Cmd/1','Light TF/1');

add_line(model,'Temp TF/1','Temp_out/1');
add_line(model,'Hum TF/1','Hum_out/1');
add_line(model,'CO2 TF/1','CO2_out/1');
add_line(model,'Light TF/1','Light_out/1');

add_line(model,'pH Cmd/1','pH Dynamics/1');
add_line(model,'EC Cmd/1','EC Dynamics/1');

add_line(model,'pH Dynamics/1','pH_out/1');
add_line(model,'EC Dynamics/1','EC_out/1');

```

```

save_system(model);

%% =====
% 3. SIMULATION LOOP + MQTT
% =====

disp('Starting simulation...');

for k = 1:50

    sim(model,'StopTime','1','Solver','ode45');

    % Отримання останніх значень
    temp = temp_out(end);
    hum = hum_out(end);
    co2 = co2_out(end);
    light = light_out(end);
    ph = ph_out(end);
    ec = ec_out(end);

    % Публікація в Node-RED
    write(client,"sim/temp",num2str(temp));
    write(client,"sim/humidity",num2str(hum));
    write(client,"sim/co2",num2str(co2));
    write(client,"sim/light",num2str(light));
    write(client,"sim/ph",num2str(ph));
    write(client,"sim/ec",num2str(ec));

    % Застосування керування
    apply_control();

    pause(1);
end

disp('Simulation finished');

%% =====
% 4. FUNCTIONS
% =====

function mqtt_callback(topic,msg)
    global climate_cmd ph_cmd ec_cmd

    if contains(topic,"climate")
        climate_cmd = msg;

```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						94
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

elseif contains(topic,"ph")
    ph_cmd = msg;
elseif contains(topic,"ec")
    ec_cmd = msg;
end
end

function apply_control()
    global climate_cmd ph_cmd ec_cmd

    % Просте кодування команд
    if climate_cmd == "heat"
        assignin('base','Climate Cmd',1);
    elseif climate_cmd == "cool"
        assignin('base','Climate Cmd',-1);
    else
        assignin('base','Climate Cmd',0);
    end

    if ph_cmd == "acid"
        assignin('base','pH Cmd',-0.1);
    elseif ph_cmd == "base"
        assignin('base','pH Cmd',0.1);
    else
        assignin('base','pH Cmd',0);
    end

    if ec_cmd == "nutrients"
        assignin('base','EC Cmd',0.05);
    else
        assignin('base','EC Cmd',0);
    end
end
end

```