

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри КСУ
_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми
«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»
на тему: «Ресурсозбережне керування процесом вирощування рослин методом
аeroponіки»

Здобувача групи СУ.м-21

Юдін Геннадій Ігорович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання
ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

(підпис)

Геннадій ЮДІН

Керівник: Доцент кафедри КСУ к.ф.-м.н Сергій СОКОЛОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри

_____ Леонтьєв П. В.

_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти
Юдіну Геннадію Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: Ресурсозбережне керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки. Затверджена наказом ректора СумДУ. №1097-VI від “09” жовтня 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 17 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація, список літературних джерел з матеріалами опису і автоматизації технологічного процесу тощо.

4. Зміст пояснювальної записки: аналіз предметної області, технологічна характеристика методу аеропоніки, вимоги до автоматизованої системи керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки, алгоритм роботи автоматичної системи процесом вирощування рослин методом аеропоніки, автоматизована система керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки, вибір засобів автоматизації, моделювання системи в середовищі Matlab, підбір та налаштування регуляторів, аналіз отриманих даних.

5. Перелік графічних матеріалів: 37 рисунків, 3 таблиці

6. Календарний план проектування.

Номер етапу	Зміст етапу проектування	Термін виконання
1	Аналіз завдання кафедри. Складання технічного завдання. Підбір та аналіз літератури і першоджерел.	14.09.2023 – 16.10.2023
2	Аналіз предметної області. Область застосування.	16.10.2023 – 18.11.2023
3	Аналіз алгоритму роботи автоматичної системи управління аеропонної установки.	18.11.2023 – 02.11.2023
4	Розробка автоматизованої системи управління аеропонної установки.	02.11.2023 – 21.11.2023
5	Вибір засобів автоматизації.	21.11.2023 – 03.12.2023
6	Моделювання системи та аналіз отриманих даних	03.12.2023 – 13.12.2023
7	Оформлення дипломного проекту та супровідної документації	13.12.2023 – 15.12.2023

7. Дата видачі завдання “14” вересня 2023р.

Керівник проекту:

к.ф.-м.н. Доцент

Соколов С.В.

До виконання прийняв:

студент групи СУ.м – 21

Юдін Г.І.

Анотація

Юдін Геннадій Ігорович. Ресурсозбережне керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки. Кваліфікаційна робота магістра. Сумський державний університет. Суми, 2023 р.

Проект містить 50 аркуші пояснювальної записки, 37 рисунка, 3 таблиці. При виконанні проекту було використано 15 літературних джерел.

Освітлені завдання, видані на Дипломний проект. Даний проект спрямований на створення і опис ресурсозбережного керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки. Розроблено технічне завдання. Розроблено основні технічні креслення та алгоритми роботи. В ході проекту були розроблені контури керування ресурсозбережного керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки.

Ключові слова: вирощування рослин, система керування, контури керування, ресурсозбереження, аеропоніка.

Abstract

Yudin Gennady Igorovich. Resourcecore control of the process of growing plants by the method of aeroponics. Degree project. Sumy State University. Sumy, 2023

The project contains 50 sheets of explanatory note, 37 figures, 3 tables. 15 literary sources were used in the project.

Illuminated tasks, issued for the diploma project. This project is aimed at creating and describing the resource management of the process of growing plants by the method of aeroponics. The technical task has been developed. The main technical drawings and algorithms of work have been developed. During the project, the contours of the management of the resource -saving control of the process of growing plants were developed. Keywords: plant cultivation, control system, structural scheme, resource conservation, aeroponics.

Зміст

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	12
1.1 Аналіз методів вирощування рослин.....	12
1.2 Аналіз принципу аеропоніки.....	20
1.3 Система автоматизації аеропоніки	21
РОЗДІЛ 2 АВТОМАТИЗАЦІЯ АЕРОПОНОЇ СИСТЕМИ.....	27
2.1 Контури керування	27
2.1.1 Контур освітленості.....	31
2.1.2 Контур підтримання температури.....	32
2.1.3 Контур підтримання оптимального рівня CO ₂	33
2.1.4 Контур підтримання оптимального рівня рН та Ес.....	34
2.1.5 Контур рівня концентрації речовин в розчині	35
2.1.6 Контур розпилення води на коріння	36
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АЕРОПОНІКИ	38
3.1 Температура в резервуарі з поживним розчином.....	38
3.2 Контроль обприскування системи аеропоніки	44
РОЗДІЛ 4 СКАДА СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ МЕТОДОМ АЕРОПОНІКИ.....	47
4.1 Контур освітленості.....	48
4.2 Контур підтримання температури	49
4.3 Контур підтримання оптимального рівня CO ₂	51
4.4 Контур рівня рН.....	52
4.5 Контур рівня концентрації речовин в розчині.....	53
4.6 Контур розпилення води на коріння.....	55
ВИСНОВОК.....	57
Список використаних джерел	58

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

СУ – система управління

САУ – система автоматичного управління

МК – мікроконтролер

Д – давач

ВМ – виконавчий механізм

ПЗ – програмне забезпечення

ПЛК – програмований логічний контролер

СА – схема автоматизації

КК – контур керування

ВСТУП

Вирощування рослин є важливою та невід'ємною частиною сільського господарства та харчової промисловості. Разом з тим, неефективне використання ресурсів при цьому процесі може призвести до значних економічних втрат та негативного впливу на довкілля.

Аeropоніка – це метод вирощування рослин у повітрі без використання ґрунту. Коріння рослин занурене у спеціально підготовлений розчин поживних речовин, який подається до коріння через спеціальні насадки. Таким чином, aeropоніка дозволяє рослинам отримувати всі необхідні поживні речовини та воду, забезпечуючи при цьому максимально ефективно використання ресурсів.

Однією з головних переваг aeropоніки є висока продуктивність у порівнянні з традиційними методами вирощування рослин. Дослідження показують, що метод aeropоніки дозволяє збільшити врожайність на 30-50% за одночасного зниження витрат на воду та добрива.

Також метод aeropоніки дозволяє рослинам зростати швидше і займати менше площі, що особливо актуально в умовах обмежених ресурсів і населення планети. Крім того, aeropоніка дозволяє вирощувати рослини цілий рік, що робить її особливо перспективною в регіонах із несприятливим кліматом.

Однак, незважаючи на всі переваги, метод aeropоніки має свої обмеження. Наприклад, необхідно забезпечити постійну та точну підтримку розчину поживних речовин, що вимагає використання спеціального обладнання та контролю параметрів середовища. Крім того, на даний момент метод aeropоніки не може застосовуватись для вирощування всіх видів рослин.

В цілому, метод aeropоніки є ефективним і перспективним підходом до вирощування рослин, який дозволяє максимально ефективно використовувати ресурси при цьому.

Крім того, aeropоніка також є екологічно безпечнішим методом вирощування рослин, оскільки не вимагає використання пестицидів та гербіцидів, що зменшує ризик забруднення ґрунту та води.

Важливим аспектом успішного застосування методу аеропоніки є правильне управління процесом вирощування рослин, що включає контроль параметрів середовища, складання оптимальних режимів подачі поживних речовин і води, а також систематичне спостереження за зростанням і розвитком рослин.

Таким чином, застосування методу аеропоніки у вирощуванні рослин може призвести до суттєвої економії ресурсів, збільшення врожайності та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Однак, для успішного застосування даного методу необхідно проводити комплексні дослідження, що визначають оптимальні умови для вирощування різних видів рослин, а також забезпечувати правильне керування вирощуванням.

Для досягнення ресурсозбережного керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки, знадобляться наступні компоненти та заходи:

Обладнання для аеропоніки:

- **Система наплення:** Вам потрібно мати ефективну систему, яка забезпечить розпил поживних розчинів на коріння рослин.
- **Дифузори або форсунки:** Для створення туману з поживних розчинів.
- **Тримачі для рослин:** Спеціальні конструкції для розміщення рослин у вільному повітрі.

Контроль параметрів:

- **Система вимірювання та регулювання рН:** Для забезпечення оптимального рівня кислотності поживного розчину.
- **Моніторинг вологості та температури:** Для контролю умов оточення, які впливають на рослини.
- **Сенсори для вимірювання рівнів поживних розчинів:** Для підтримання оптимального рівня живлення.

Система живлення:

- **Поживні розчини:** Потрібно розробити оптимальний склад розчинів, які будуть постачати всі необхідні поживні речовини рослинам.
- **Джерело води:** Забезпечення чистої та безпечної води для приготування поживних розчинів.

Енергозабезпечення:

- **Енергоєфективне обладнання:** Обране обладнання повинно бути енергоєфективним для зменшення витрат електроенергії.

Система контролю та автоматизації:

- **Контролер аеропонної системи:** Для автоматизації різних процесів та реагування на зміни параметрів.
- **Програмне забезпечення для моніторингу:** Для віддаленого моніторингу та управління системою.

Система відходів:

- **Ефективна система видалення відходів:** Оскільки в аеропоніці не використовується ґрунт, необхідно передбачити ефективний спосіб видалення залишків розчинів і відпрацьованих рослин.

Моніторинг результатів:

- **Система ведення журналу та аналізу даних:** Для відстеження параметрів росту рослин, рівнів витрат ресурсів та ефективності системи.

Розробка та впровадження всіх цих елементів вимагатиме співпраці з експертами в області аеропоніки, інженерів, агрономів та інших спеціалістів. Також важливо розробити детальний план вирощування рослин, визначивши оптимальні умови для конкретних видів культур.

Мета роботи: Розроблення ресурсозбережної системи автоматизації. Розробити функціональну схему, контури керування, SCADA системи аеропоніки. Представити модель опису процесів, що представляє система аеропоніки. Зібрати схему в середовищі MATLAB, та настроїти ПД регулятор.

Проблема дослідження: Математичний опис процесів, що представляє собою процеси, що відбуваються в системі.

Об'єктом дослідження: є автоматизована система управління, в якій оптимізується система керування процесом вирощування рослин методом аеропоніки

Предметом дослідження: математична модель системи, вирощування рослин методом аеропоніки.

Завдання дослідження: Огляд та аналіз існуючих способів вирощування рослин, описання принципів аеропоніки, розгляд існуючих ідей для автоматизації, розроблення функціональної схеми та контурів керування, математичний опис процесів та їх моделювання, налаштування регулятора, розробка SCADA системи аеропоніки

Наукова новизна роботи:

На основі переглянутих даних, покращена функціональна схема системи керування аеропонікою.

Для неї вперше розроблені контури керування.

На основі математичних розрахунків, була розроблена схема моделювання.

Вперше розроблена SCADA системи аеропоніки.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз методів вирощування рослин

Вирощування рослин - це процес, що включає в себе ряд дій і методів для створення сприятливих умов для розвитку рослин. Залежно від типу рослин і умов оточуючого середовища, існують різні методи вирощування. Ось деякі з них:

Посів на відкритому ґрунті:

Основні аспекти та методи вирощування рослин:

Ґрунтовий метод[1]:

- Основа вирощування: Використання ґрунту як основного середовища для розвитку рослин.
- Обробка ґрунту: Підготовка ґрунту перед посівом за допомогою плугів, грабелів, тракторів та інших сільгоспмашин.
- Добрива: Застосування природних або штучних добрив для забезпечення рослин необхідними поживними речовинами.

Культурна ротація:

- Зміна культур: Зміна видів рослин на одному полі для збільшення родючості ґрунту та запобігання захворювань.

Запобігання шкідникам і хворобам:

- Застосування пестицидів та фунгіцидів: Для контролю за шкідниками та захворюваннями рослин.
- Механічні заходи: Використання сільськогосподарських машин та методів для боротьби зі шкідниками.

Полив:

- Залежно від клімату: Використання природного опаду або систем поливу для забезпечення рослин вологою.

Машини та техніка:

- Трактори, комбайни та інші машини: Використання для обробки ґрунту, посіву, збирання врожаю та інших аспектів сільського господарства.

Переваги та виклики:

Переваги:

- **Доступність:** Традиційні методи вирощування широко використовуються та доступні для більшості сільських господарств.
- **Досвід:** Фермери мають довгий досвід у використанні цих методів.
- **Доступ до природних ресурсів:** Залежно від місцевих умов, господарства можуть використовувати природні ресурси, такі як ґрунт і вода.

Виклики:

- **Витрати на працю та час:** Звичайні методи можуть вимагати значних витрат на працю та час.
- **Водозбереження:** У деяких регіонах проблеми з водозбереженням можуть впливати на урожайність.
- **Шкідники та хвороби:** Залежно від клімату, господарства можуть стикатися з проблемами шкідників та хворобами.

Загальний висновок:

Звичайне сільське господарство залишається основним методом вирощування рослин у багатьох регіонах світу, адаптуючись до місцевих умов та технологічних можливостей. Його ефективність залежить від компетентного управління ресурсами та природними умовами.

Гідропоніка[1]:

Основні принципи та методи:

Безґрунтове вирощування:

- **Відсутність ґрунту:** Рослини вирощуються безпосередньо у водному розчині, не використовуючи ґрунт.
- **Спеціальні контейнери:** Корені рослин можуть знаходитися у спеціальних контейнерах, які підтримують їхню стійкість.



Рисунок 1 - Вирощування методом гідропоніки[1]

Живлення через воду:

- **Поживні розчини:** Рослини отримують всі необхідні поживні речовини через водний розчин, який часто містить збалансовані добрива.
- **Моніторинг поживних розчинів:** Забезпечується точний контроль за складом та концентрацією розчину.

Системи рециркуляції:

- **Використання води:** Вода рециркулюється у системі, що дозволяє зменшити витрати та ефективно використовувати ресурси.

Контроль середовища:

- **Оптимальне середовище:** Гідропонічні системи надають можливість контролювати температуру, вологість, освітлення та інші параметри навколишнього середовища.

Типи гідропонічних систем:

Наповнення та злив (Ebb and Flow):

- Циклічний полив: Вода зливається на корені рослин, а потім відтікає, забезпечуючи доступ до кисню.

Система крапельного поливу (Drip System):

- Точковий полив: Вода поступає до коренів краплею, що забезпечує ефективне використання води та добрив.

Плаваюча система (Deep Water Culture):

- Плаваючі платформи: Рослини розміщуються на плаваючих платформах, занурених у водний розчин.

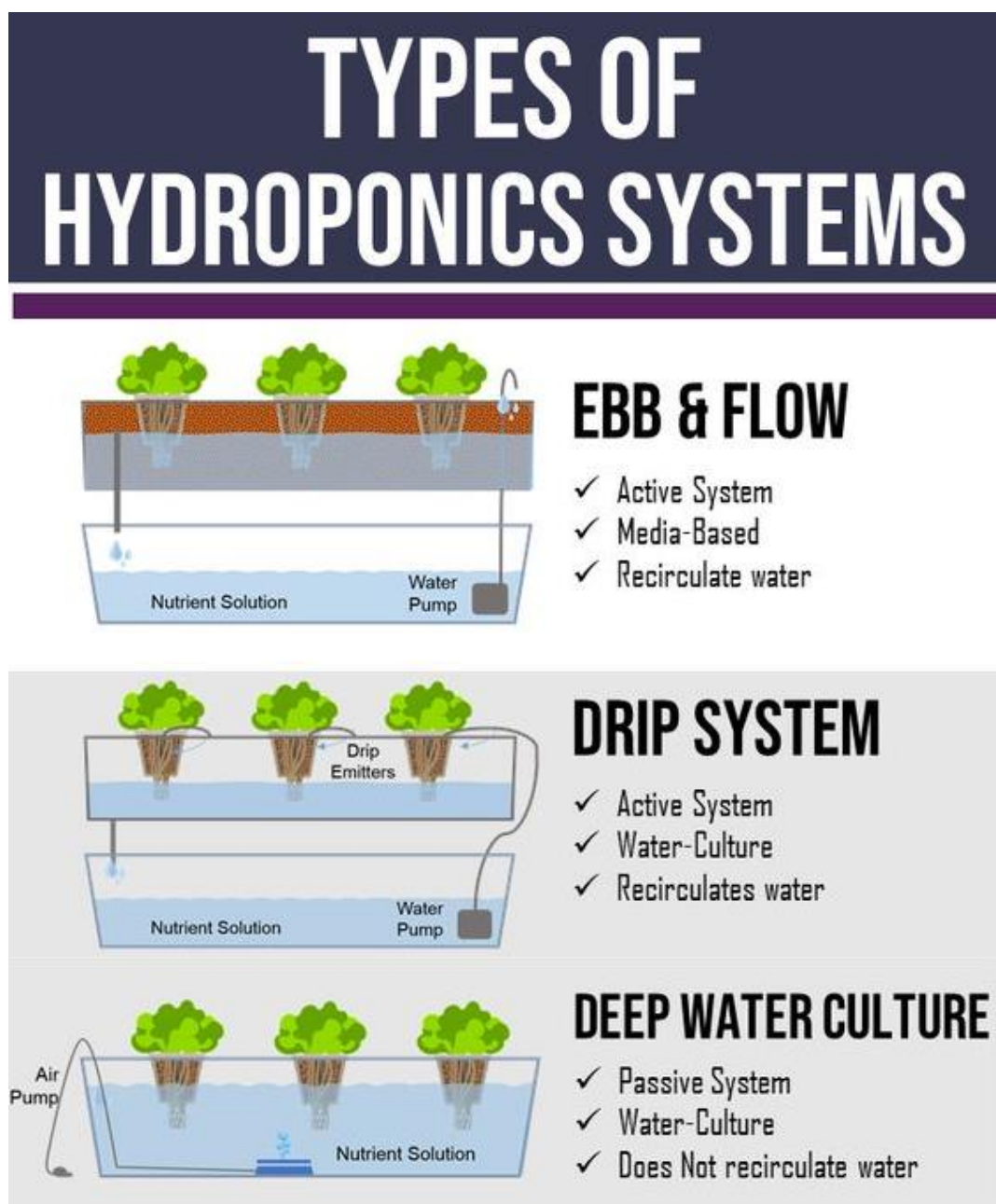


Рисунок 2 - Типи гідропонічних систем[2]

Переваги та виклики гідропоніки[2]:

Переваги:

- Ефективність використання ресурсів: Зменшення витрат води і добрив за рахунок точного контролю над ними.
- Швидший ріст: Рослини часто ростуть швидше, оскільки отримують ідеальне співвідношення поживних речовин.

Виклики:

- Вартість устаткування: Початкові витрати на устаткування гідропонічної системи можуть бути високими.
- Потреба в електроенергії: Деякі системи вимагають електропостачання для функціонування pomp та інших устаткувань.

Загальний висновок:

Гідропоніка є інноваційним підходом до вирощування рослин, що дозволяє забезпечити оптимальне середовище для росту та максимально ефективно використовувати ресурси. Цей метод особливо корисний у регіонах з обмеженим доступом до ґрунту або води, а також в комерційних та наукових сферах сільського господарства.

Аеропоніка

Основні принципи та методи:

Спосіб подачі поживних розчинів:

- Туман чи аерозоль: Корені рослин знаходяться у відкритому просторі, і поживний розчин подається до кореневої зони у вигляді туману або аерозолю.



Рисунок 3 -Теплиця з використанням аеропоніки для вирощування[3]

Контроль за середовищем[3]:

- Оптимальні умови: Забезпечення стабільних параметрів середовища, таких як температура, вологість та освітлення.

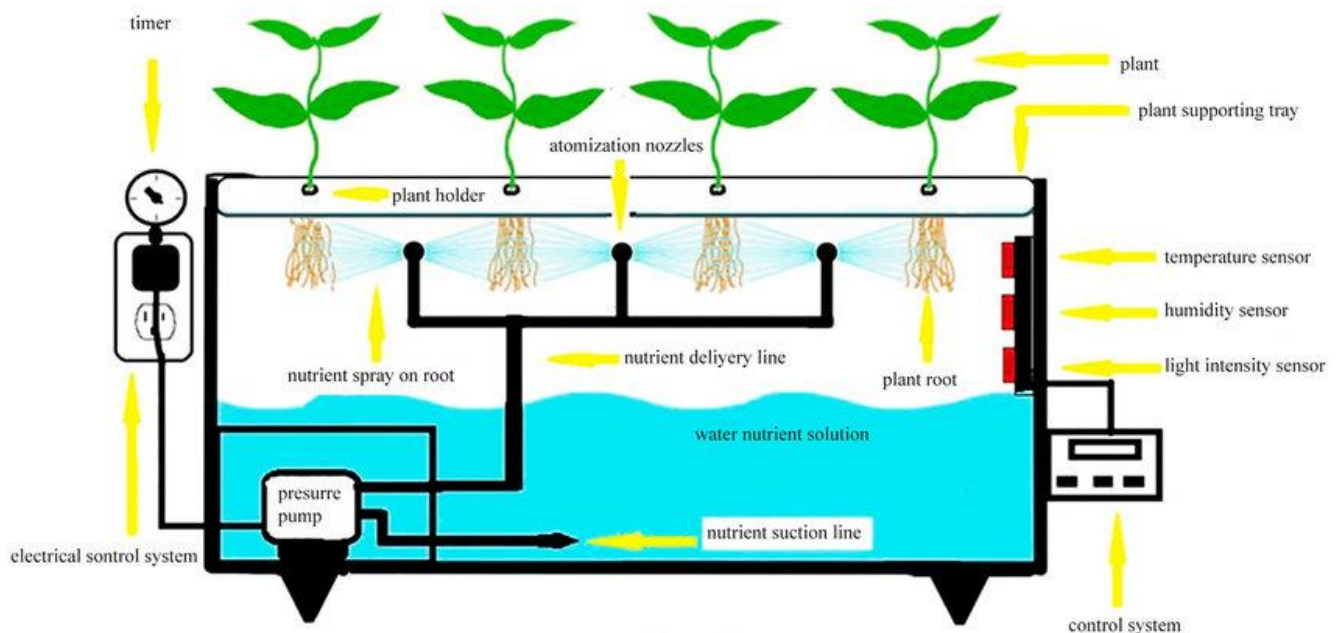


Рисунок 4 - Принцип аеропоніки[4]

Використання допоміжних структур:

- Контейнери або трубопроводи: Використовуються для підтримки рослин та забезпечення їхньої стійкості.

Переваги та виклики аеропоніки[4]:

Переваги аеропоніки:

- Ефективність живлення:
 - Максимальний доступ до кисню: Корені отримують більше кисню, що сприяє швидшому росту та розвитку рослин.
 - Ефективне використання добрив: Забезпечення точного дозування поживних речовин, що дозволяє економити добрива та уникнути пере- або недодавання.
- Швидший ріст рослин:
 - Стимулювання росту: Рослини, вирощені в аеропоніці, часто ростуть швидше порівняно із традиційним ґрунтовим вирощуванням.
- Зменшення ризику захворювань:
 - Відсутність ґрунту: Метод вирощування без ґрунту допомагає уникнути ґрунтових хвороб та шкідників.
- Ефективне використання простору:
 - Можливість розміщення більшої кількості рослин на одиниці площі: Зменшення потреби у великих земельних ділянках.



Рисунок 5 - Картопля що вирощена методом аеропоніки[5]

Виклики аеропоніки:

- Система контролю:
 - Необхідність точного контролю за системою: Відсутність ґрунту вимагає ретельного моніторингу та регулювання параметрів росту.
- Потреба у джерелі енергії:
 - Системи насосів і форсунок: Робота системи вимагає енергії, що може збільшувати витрати на електроенергію.
- Початкові витрати:
 - Вартість встановлення: Початкові витрати на систему можуть бути високими.

Загальний висновок:

Аeropоніка є сучасним методом вирощування рослин, який надає кращий доступ до поживних речовин та кисню. Вона дозволяє підвищити ефективність вирощування рослин, особливо в умовах обмеженого простору чи ресурсів. Такий підхід є популярним у комерційному сільському господарстві та дослідницьких лабораторіях.

1.2 Аналіз принципу aeropоніки

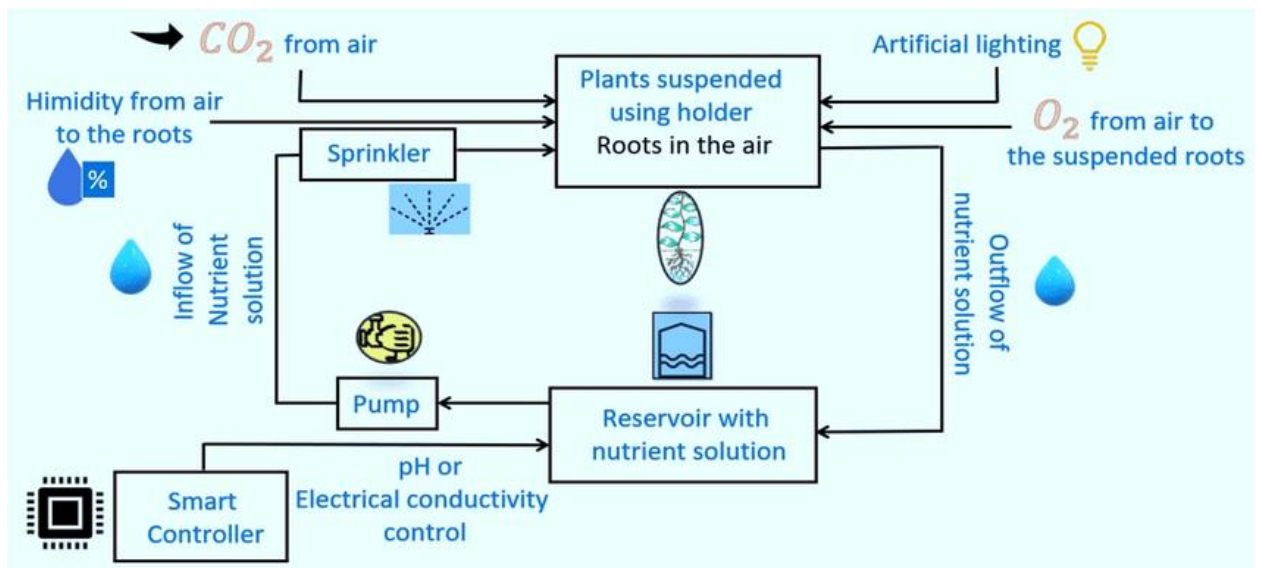


Рисунок 6 - Принцип роботи системи aeropоніки[6]

Рослини у системах aeropоніки (рисунок 6) утримуються у повітрі за допомогою штучного утримувача. Вода та поживні речовини для коренів рослин, постачаються за допомогою системи обприскування. У результаті корені отримують поживні речовини, кисень та воду. Листя рослин поглинають вуглекислоту (CO₂) з повітря. Сонячне світло або штучне світло світлодіодних ламп забезпечують світлову енергію для фотосинтезу рослин. Контролер підтримує стабільний рівень рН та ЕС розчину речовин. Метод aeropоніки може ефективно використовуватися для культивування рослин в умовах обмеженого простору або відсутності родючого ґрунту [7]. Ці системи потребують менше простору і витрачають на 95% менше води порівняно з традиційними системами. Aeropонні системи забезпечують швидший темп росту при умові контролю подачі води та

поживних речовин, з урахуванням вимог рослин. Параметри, такі як електропровідність та рівень рН у розчині поживних речовин, вологість, концентрація розчиненого кисню в повітрі, інтенсивність світла та температура оточуючого середовища, частота зрошування поживного розчину, час та інтервал атомізації і так далі - це фактори, які варто регулювати у автоматизованій системі аеропоніки [8].

Element	Symbol	Classification	Chemical Form Taken into the Plant
Hydrogen	H	Nonmineral nutrient	H ₂ O
Oxygen	O	Nonmineral nutrient	O ₂ and CO ₂
Carbon	C	Nonmineral nutrient	CO ₂
Nitrogen	N	Macronutrient	NH ₄ ⁺ and NO ₃ ⁻
Phosphorus	P	Macronutrient	H ₂ PO ₄ ⁻ and H ₂ PO ₄ ²⁻
Potassium	K	Macronutrient	K ⁺
Calcium	Ca	Secondary element	Ca ²⁺
Magnesium	Mg	Secondary element	Mg ²⁺
Sulfur	S	Secondary element	SO ₄ ²⁻
Boron	B	Micronutrient	B(OH) ₃
Chlorine	Cl	Micronutrient	Cl ⁻
Copper	Cu	Micronutrient	Cu ²⁺
Iron	Fe	Micronutrient	Fe ²⁺ and Fe ³⁺
Manganese	Mn	Micronutrient	Mn ²⁺
Molybdenum	Mo	Micronutrient	MoO ₄ ²⁻
Nickel	Ni	Micronutrient	Ni ²⁺
Zinc	Zn	Micronutrient	Zn ²⁺

Table 7.
Essential Plant
Nutrients

Рисунок 7 - Необхідні нутрієнти та мікроелементи

1.3 Система автоматизації аеропоніки

Вирощування в аеропоніці відбувається як на відкритих так і в закритих приміщеннях або теплицях, де забезпечується контрольоване середовище. Також може відбуватися в спеціалізованому приміщенні з встановленою системою освітлення для росту рослин, централізованим постачанням поживного розчину та електропостачанням. Рослини, які вирощуються, поміщаються в камеру для росту та періодично обприскуються поживним розчином за допомогою дрібних струменів через дюзу атомізації. Крім того, система аеропоніки надає можливість точного контролю навколишнього середовища всієї камери для росту[8].

Аeropоніка здійснюється без використання ґрунту чи будь-якого твердого середовища. Тому основні виявлені труднощі включають в себе буферизацію води та поживних речовин, можливі відмови в роботі водяних насосів, розподіл і приготування поживного розчину, засмічення дюз атомізації та інші проблеми, які можуть призводити до швидкої загибелі вирощених рослин [9]. Дослідники [10] зауважили, що система aeropоніки забезпечує ефективний контроль за ростом рослин та доступністю поживних речовин, запобігаючи рослинам різним захворюванням та гнилі коренів. Однак у процесі вирощування рослин, починаючи від сходів і закінчуючи збором врожаю, методи aeropоніки вимагають обмеженого ручного втручання, фізичної присутності та експертного рівня знань у галузі ботаніки, контролю навколишнього середовища та виконання операцій для ефективного управління та контролю за ростом рослин.

Таблиця 1 - Основні параметри моніторингу та контролю в аеропонній системі[8].

№	Параметри	Значення	Виконавчі пристрої
1	Розпил поживних речовин	Розмір туману/розпилення/аерозолю/крапель при високому тиску становить від 10 до 100 мікрон, при низькому тиску - від 5 до 50 мікрон, а для ультразвукових утворювачів туману - від 5 до 25 мікронів	Дюза для атомізації (при високому і низькому тиску, аерозольні атомізатори)
2	Середовище для вирощування	Забезпечення утримання рослини	Будь-яка штучна структура для підтримки коренів
3	Бажаний рівень рН розчину поживних речовин	Значення рН залежить від сорту (цибуля - 6.0–7.0, огірок - 5.8–6.0, морква - 5.8–6.4, шпинат - 5.5–6.6, салат - 5.5–6.5, томат - 5.5–6.5, картопля - 5.0–6.0)	Пристрій для вимірювання рівня рН
4	Бажана електропровідність (ЕС) розчину поживних речовин	Значення електропровідності (ЕС) залежить від сорту (цибуля - 1.4–1.8, огірок - 1.7–2.2, морква - 1.6–2.0, шпинат - 1.8–2.3, салат - 0.8–1.2, томат - 2.0–5.0, картопля - 2.0–2.5 дС/м)	Пристрій для вимірювання рівня ЕС
5	Вологість	Забезпечення наявності вологості	Пристрій для вимірювання вологості
6	Температура	Оптимальна температура від 15°C до 25°C і не повинна перевищувати 30°C, а також не опускатися нижче 4°C	Пристрій для вимірювання температури
7	Світловий потік	Внутрішнє освітлення для вирощування повинне бути достатньо	Пристрій для вимірювання рівня освітленості
8	Час атомізації	Залежить від стадії росту сорту	Управління системою за допомогою таймера
9	Інтервал часу між атомізаціями	Залежить від стадії росту сорту	Управління системою за допомогою таймера

Також існує вимога для збереження та утримання параметрів поживного розчину, таких як температура поживних речовин, рівень рН та концентрація електропровідності (ЕС), в вузьких межах оптимальних значень для ефективного росту рослин. Виходження цих параметрів за рамки бажаного діапазону може

створювати численні проблеми для росту рослин. Крім того, існують додаткові параметри, такі як час атомізації, інтервал між атомізаціями, температура повітря, відносна вологість, інтенсивність світла та концентрація вуглекислого газу (CO₂), які можуть бути налаштовані для оптимізації подальшого росту рослин. Враховуючи ці додаткові параметри, система стає складною та вимагає значних зусиль та часу від оператора, а також високого рівня навчання та навичок для ефективної роботи з нею. Тим не менше, оператор залишається відповідальним за ефективний контроль і відстеження змін в цих параметрах, щоб забезпечити оптимальні умови росту для конкретних рослин[8].

З цієї причини в аеропонну систему впроваджено більш вдосконалені методи моніторингу для виявлення несправності, реального часу моніторингу та управління, а також автоматизації системи. Таким чином, використання інтелектуальних інструментів (рисунок 8) в аеропонній системі для виявлення несправності та діагностики проблем вчасно може допомогти уникнути швидких пошкоджень вирощених рослин і повністю автоматизувати аеропонну систему

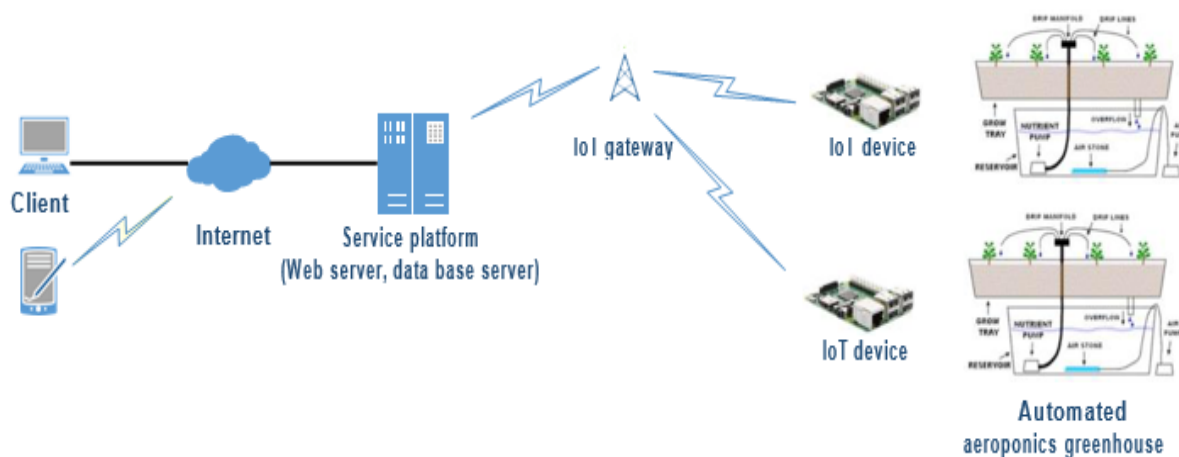


Рисунок 8 - Автоматизована система аеропоніки з використанням пристроїв Інтернету речей (IoT) [11]

У цьому прикладі (рисунок 8) використовується Raspberry PI Zero для отримання інформації (рівень рН, температура та вологість) від датчиків для управління водяним насосом та дозуючим насосом для додавання поживних речовин та води. Зібрана інформація зберігається в базі даних, відправляючи SQL-

запит. Виводи GPIO на Raspberry PI Zero з'єднують датчики температури та вологості DHT11, а також рН-зонд Atlas scientific та EZO Circuit, датчик рівня води, світлодіодні лампи, занурюваний насос та дозуючі насоси для постачання поживних речовин. На рисунку 9 показана алгоритм системи пристроїв Інтернету речей.

Кожен пристрій Інтернету речей збирає дані датчиків (температура, вологість та рівень рН) протягом певного часу. Після перевірки рівня поживи, якщо він менше певного порогового значення, Raspberry PI Zero вмикає реле. Підключені дозуючі насоси починають працювати, щоб додавати поживні речовини в систему аеропоніки. Якщо рівень поживи перевищує певне порогове значення, система перестає додавати поживні речовини в систему аеропоніки. Процес роботи занурюваного насоса подібний до процесу роботи дозуючого насоса.

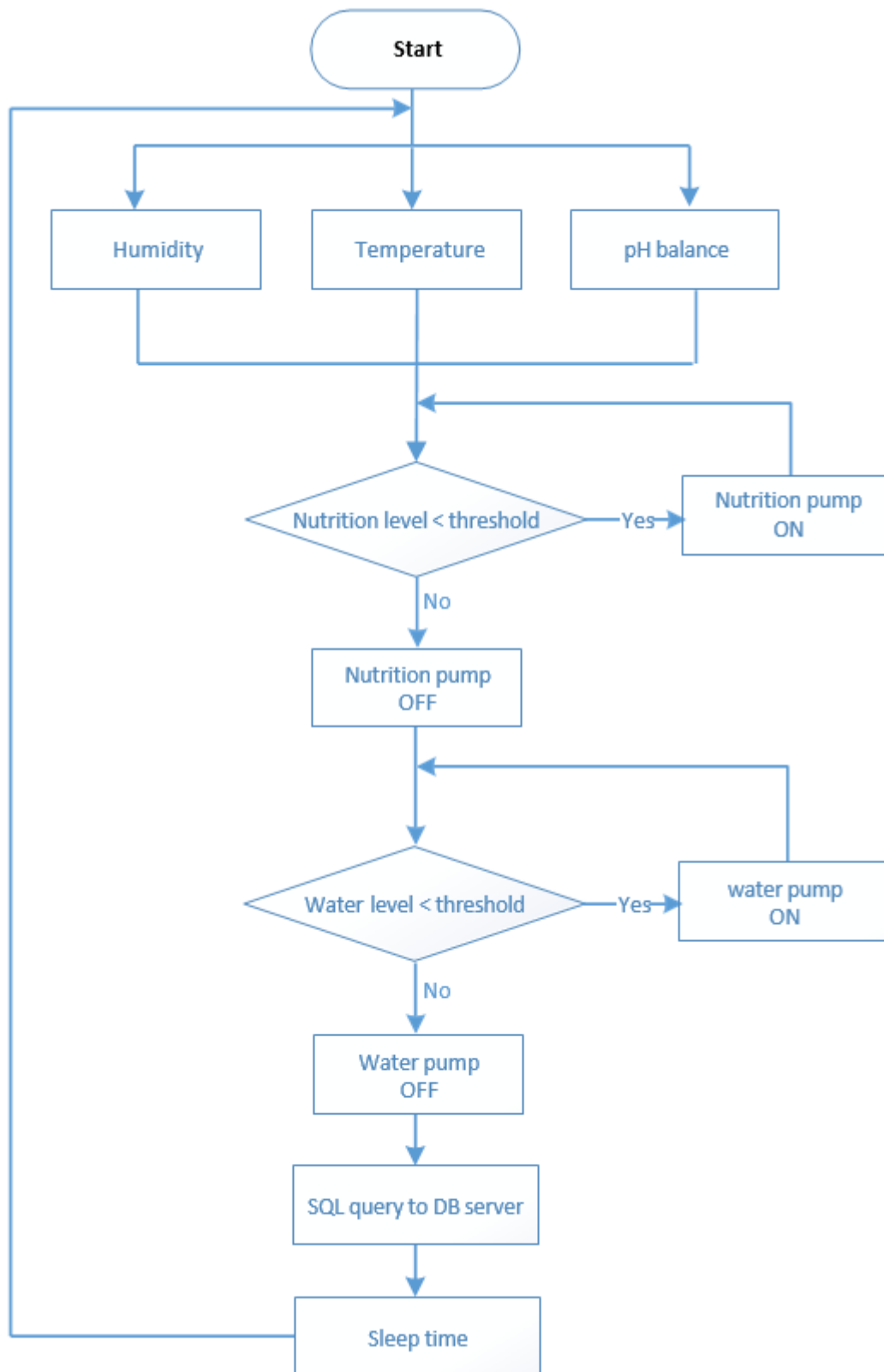


Рисунок 9 – Приклад алгоритму автоматизації[11]

РОЗДІЛ 2 АВТОМАТИЗАЦІЯ АЕРОПОНОЇ СИСТЕМИ

На мою думку, саме ресурсозбережне керування, являє собою оптимізоване використання ресурсів, а також зменшення тривалості періоду росту при тому ж обсягу продукції. Також можна додати гормони росту, але це вже може вплинути на якість продукції. По домашньому експерименту, що я мав можливість бачити, гормони росту дійсно пришвидшують ріст рослин, але при надлишковому рівні, рослина дає «сбій» росту. На прикладу редьки, її коренеплоди стали більш волокнисті, й крохмальними, коли ж стеблі неприродно великі. Органолептичні властивості, також зазнали погіршення. Можна і це було би додати, але вважаю, що і вже достатньо великий об'єм завдання що мені необхідно виконати. Це вже, якщо комусь захочеться на базі цього ще поліпшити систему.

Також необхідно підтримувати необхідну концентрацію, також рослина на різній стадії розвитку потребує різної концентрації розчину. Також мав можливість бачити, як люди, що вперше спробували, вибрали невірну кількість речовин на літр води. Вони взяли концентрацію на дорослу рослину, коли для тої, що тільки почала свій ріст, ця концентрація була смертельною.

2.1 Контури керування

В розглянутій системі аеропоніки, я виділив для себе такі контури керування:

На сам перед - підготовка поживного розчину, що включає в себе підтримання необхідної для рослин концентрації розчину, а також підтримання необхідного рівня рН, та електропровідності ЕС. Від стадії росту, рослина потребує різної кількості речовин. Тому необхідно задати, в залежності від дня вирощування, необхідну концентрацію. Також необхідно надати рівномірну концентрацію по усьому об'єму води. Треба час від часу вмикати гвинт, що буде перемішувати воду. Що може додатково не дати воді застоюватись, можливо, зменшення проблем з різними водоростями, мікроорганізмами. Так як поживним розчином, не тільки рослини будуть мати гарні можливості вирости, а й одноклітинні та багатоклітинні водорості. Маю досвід на своєму акваріуму.

Підтримання необхідного рівня освітленості. Можна для економії енергії, розташувати теплицю з доступом для потрапляння сонячного світла, і за рахунок датчика освітленості мати зворотній зв'язок. Якщо день ясний, то можна зменшити кількість світлового потоку, що надає рослинам лампа для вирощування.

Підтримання рівня концентрації CO₂, що надає максимальну ефективність для швидкості росту рослин, що показує знайдене мною дослідження.[12] Де можна помітити, що підвищення концентрації рівня CO₂, швидкість росту може збільшитись в 2 рази.

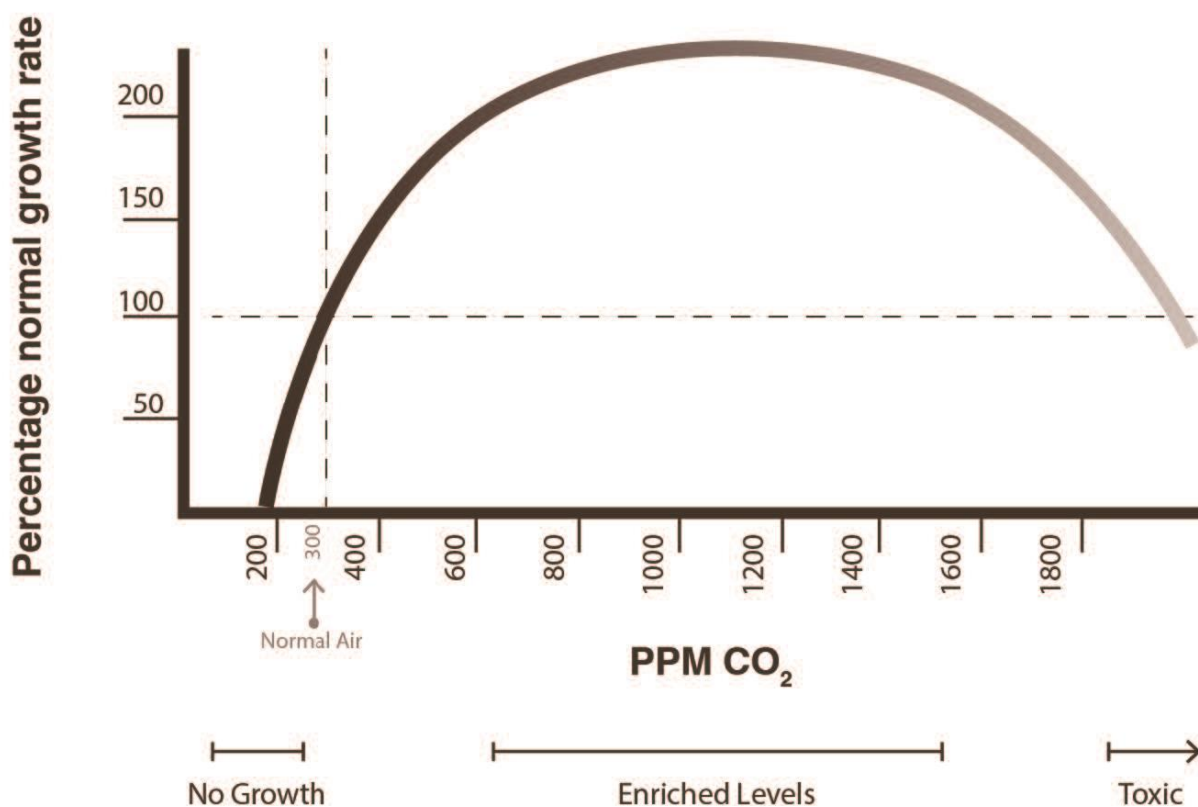


Рисунок 10 – Швидкість росту в залежності від концентрації CO₂ [12]

Розпилення на коріння за допомогою форсунок. Через те, що від стадії росту, необхідно різна концентрація, а також, й час розпилення, щоб мати час надати необхідної кількості води та речовин з нею. Тому, по досвіду дослідників, необхідно від періоду росту, поступово збільшувати час розпилення та зменшувати інтервали бездіяльності.

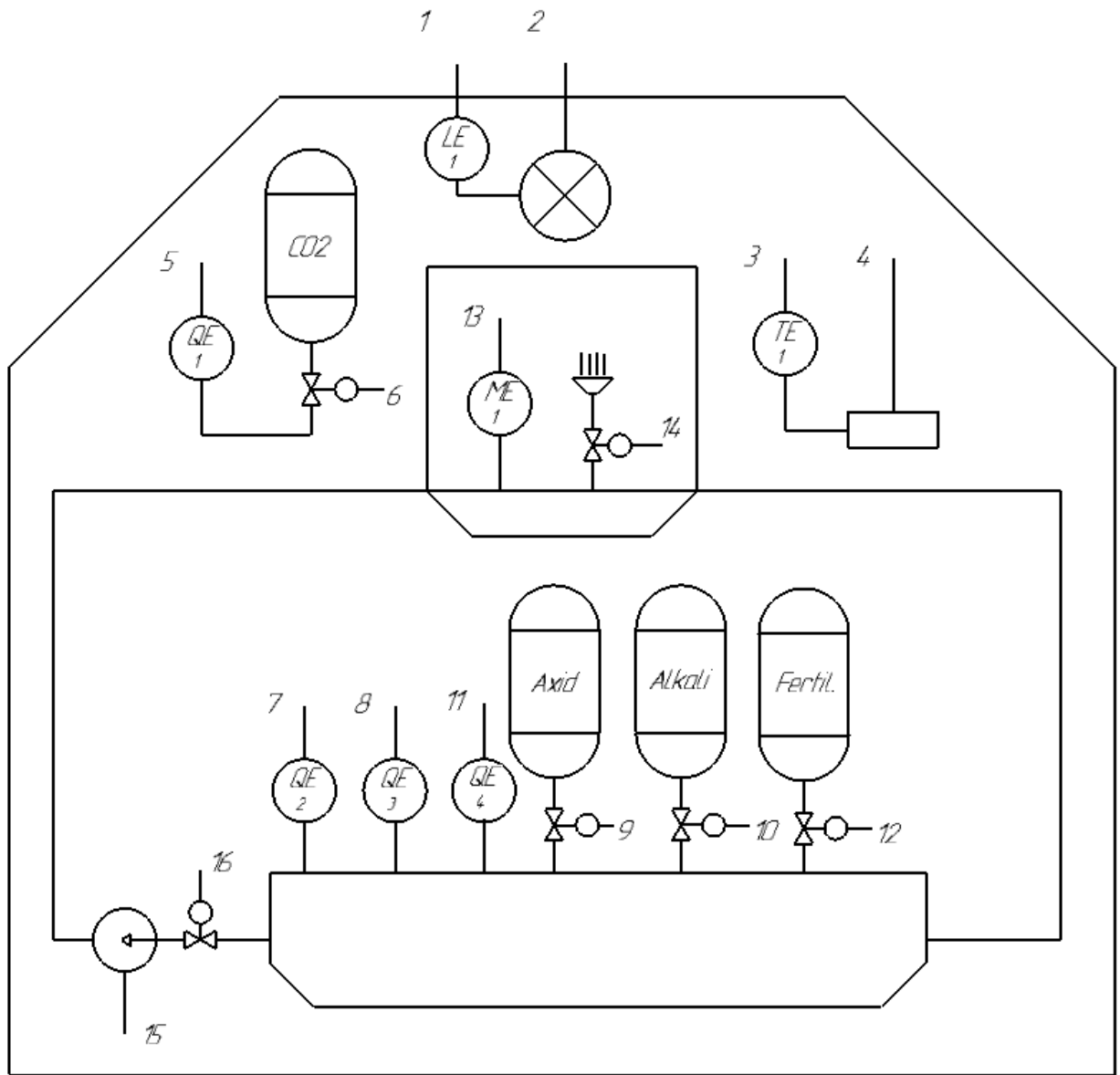
Також необхідно підтримувати задану температуру, тому ще треба додати контур підтримання температури.

Тому пропоную такі контури керування:

- Контур освітленості
- Контур підтримання температури
- Контур розпилення води на коріння
- Контур підтримання оптимального рівня CO₂

Також окремо згрупую контури, що зв'язані з підготовкою розчину:

- Контур рівня рН та Ес
- Контур рівня концентрації речовин в розчині



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
За місцем	PLC	AI																	
		DI	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		AO	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		DO																	
Панель управління	PC	DI																○	
		DO																○	
	Панель оператора																	○	

Рисунок 11 – Функціональна схема

2.1.1 Контур освітленості

Контур освітленості складеться з:

- Датчика освітленості
- Ламп для вирощування рослин

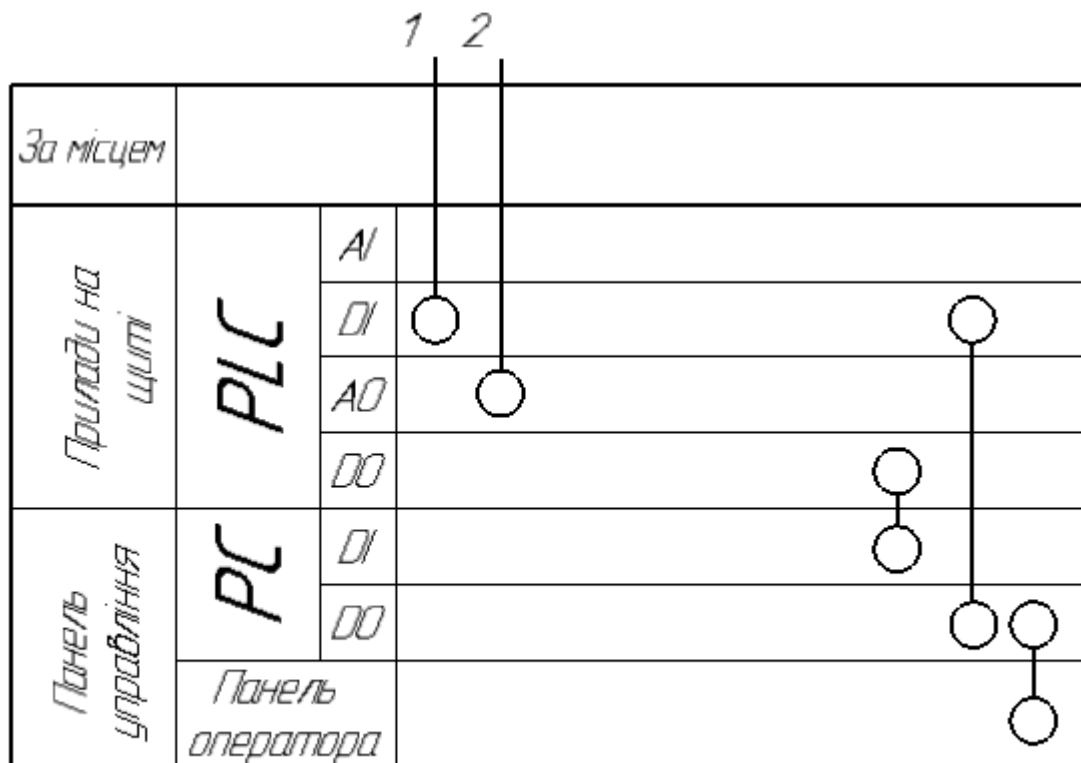
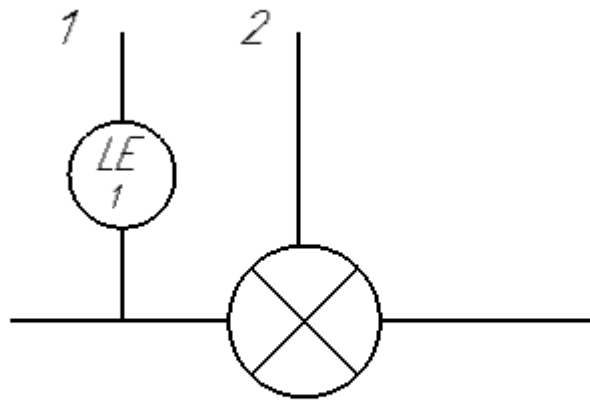


Рисунок 12 - Контур освітленості

2.1.2 Контур підтримання температури

Контур підтримання температури складеться з:

- Датчика температури
- Нагрівача

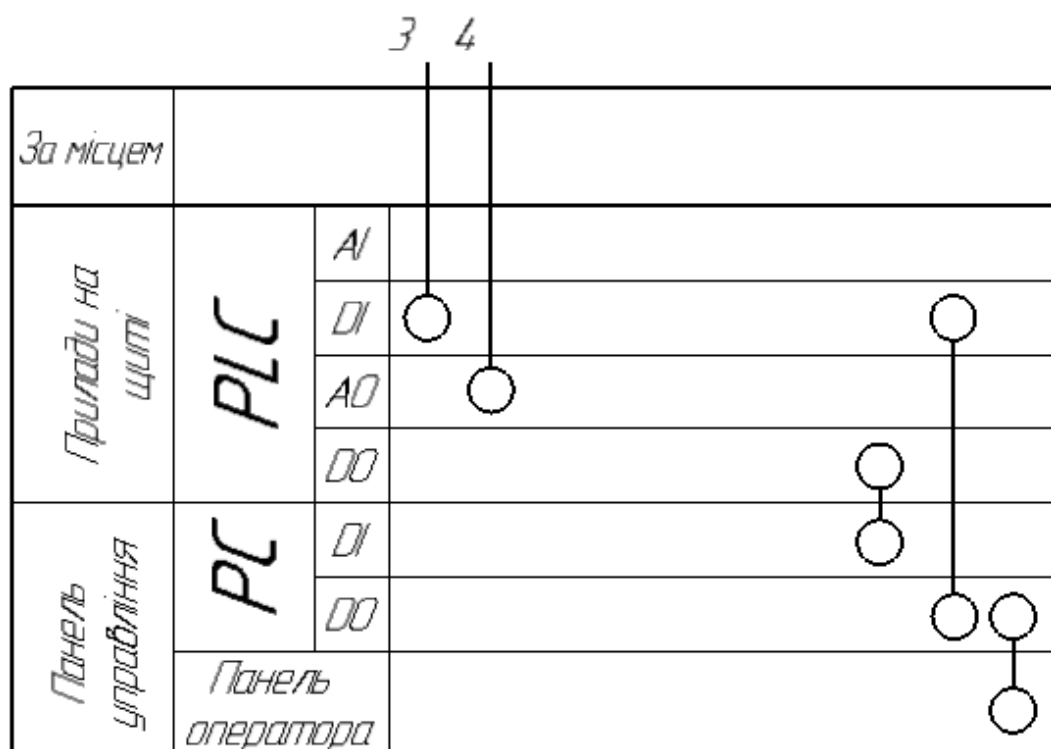
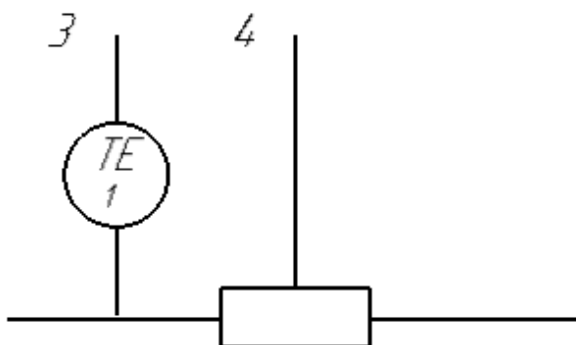
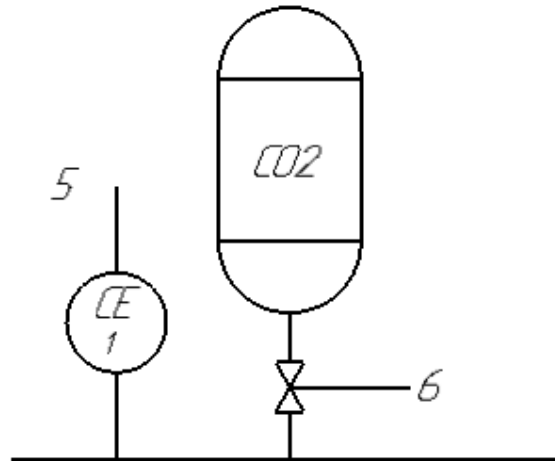


Рисунок 13 - Контур підтримання температури

2.1.3 Контур підтримання оптимального рівня CO2

Контур підтримання оптимального рівня CO2 складається з:

- Датчика CO2
- Запірна арматура від резервуару з CO2



За місцем		5 6	
Прилади на щиті	ПЛС	AI	
		DI	○
		AO	○
		DO	
Панель управління	РС	DI	○
		DO	○
	Панель оператора		○

Рисунок 14 - Контур підтримання оптимального рівня CO2

2.1.4 Контур підтримання оптимального рівня рН та Ес

Контур підтримання оптимального рівня рН та Ес складається з:

- Датчика рН
- Датчика Ес
- Запірна арматура від резервуарів концентрованими речовинами (На прикладі рН: Один з кислотою, другий з лугом)

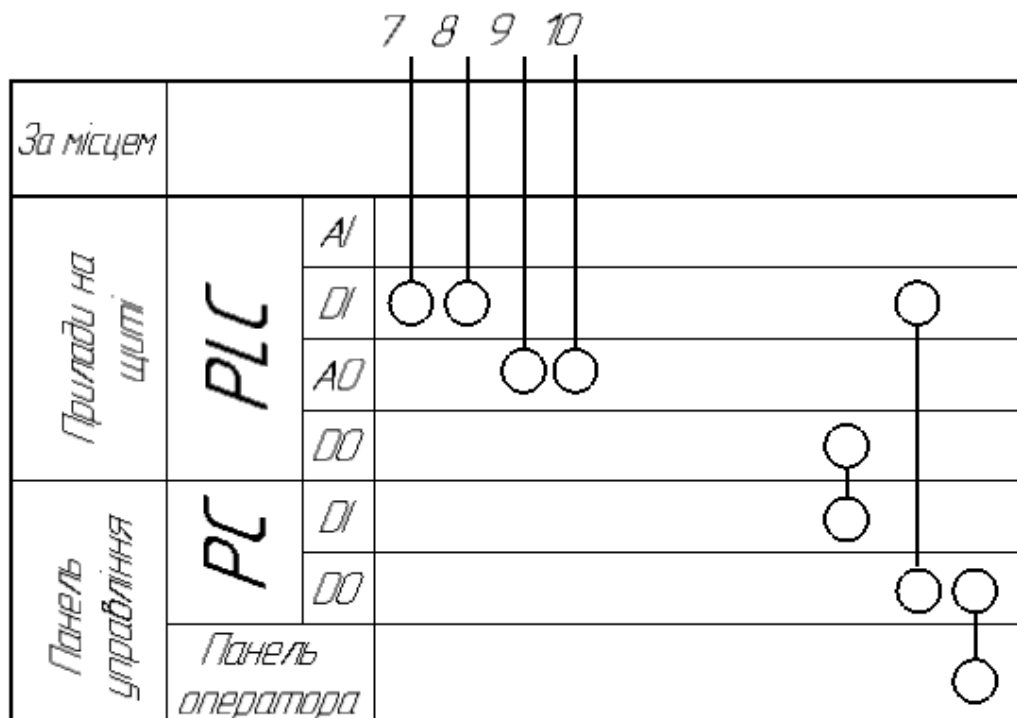
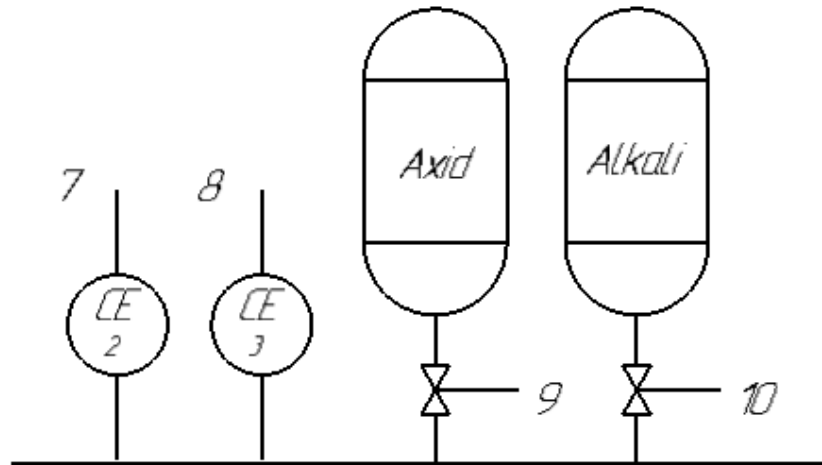


Рисунок 15 - Контур підтримання оптимального рівня рН та Ес

2.1.5 Контур рівня концентрації речовин в розчині

Контур рівня концентрації речовин в розчині складається з:

- Датчиків різних хімічних сполук, що необхідні рослині
- Запірна арматура від резервуарів концентрованими речовинами

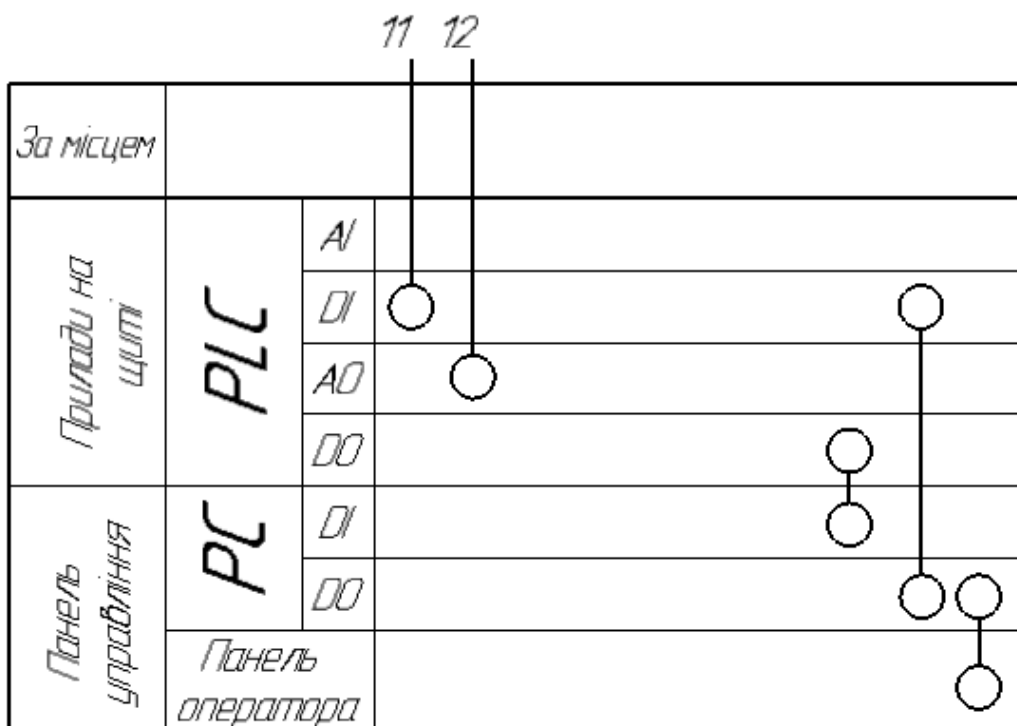
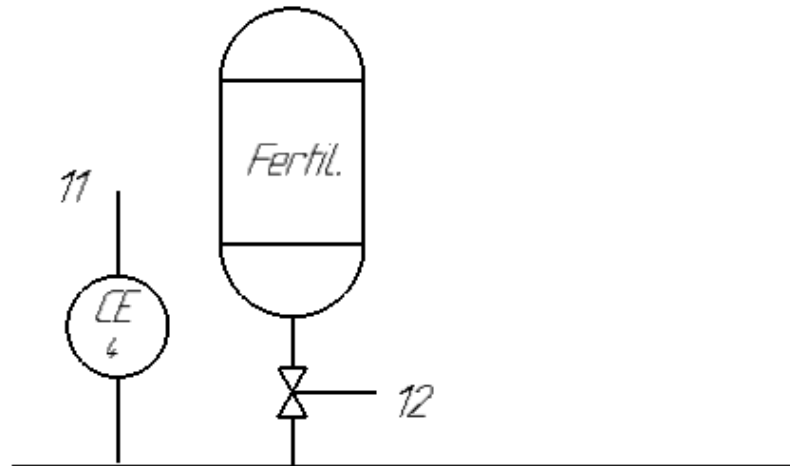


Рисунок 16 - Контур концентрації речовин в розчині

2.1.6 Контур розпилення води на коріння

Контур розпилення води на коріння складається з:

- Датчика вологості
- Насосу
- Форсунок для розпилення

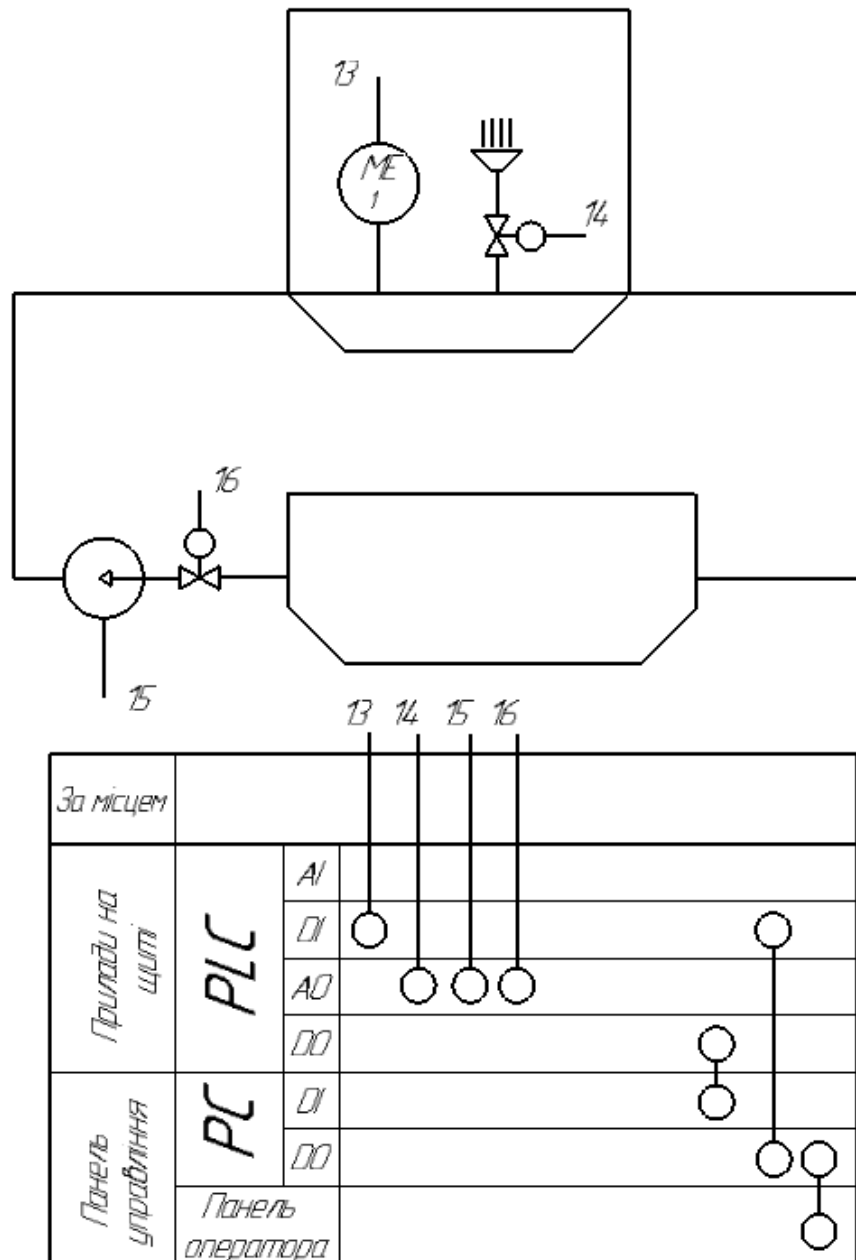


Рисунок 17 - Контур розпилення води на коріння

Таблиця 2 – Таблиця вхідних сигналів

Таблиця вхідних сигналів			
№	Сигнал	Позначення	Тип сигналу
1	Освітлення	LE	4 - 20мА
2	Температура	TE	4 - 20мА
3	Концентрація	CE	4 - 20мА
4	Вологості	HE	4 - 20мА

Таблиця 3 – Таблиця вихідних сигналів

Таблиця вихідних сигналів			
№	Сигнал	Прилад	Тип сигналу
1	Зміна потужності освітлення	Лампа для вирощування	Аналоговий
2	Зміна потужності нагрівача	Нагрівач	Аналоговий
3	Зміна концентрації	Запірний клапан з електроприводом	Аналоговий

РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АЕРОПОНІКИ

Щоб представити систему аеропонного керування, необхідно розробити математичну модель процесів, що відбуваються. На сам перед, щоб рослини не загинули, необхідно подавати воду с певною температурою. Також необхідно, відстежувати рівень в резервуарі з поживним розчином. Ну і останній етап, саме розпилення.

3.1 Температура в резервуарі з поживним розчином

При подачі розчину з неправильною температурою, можливий варіант, коли корені рослини просто загинуть. З причин може бути, загнивання коріння, утворення біоплівки, тощо. Одне з рішень, правильно підтримувати температуру в резервуарі з поживним розчином. Схему яку я розгляну, буде складатися з датчика температури, нагрівача та контролера, що буде змінювати потужність, в залежності від температури розчину.

Математичну модель динаміки температури всередині розчину, я представляю, за допомогою рівняння температурного балансу, де температура яка надійшла до резервуару за деякий проміжок часу, та температура що втрачається за деякий проміжок часу.

Так як зміна температури представлена нагрівачем, то

$$Q = P,$$

P – потужність обігрівача.

В диференціальній формі набуває вигляду:

$$dQ = Pdt,$$

Тоді рівняння температурного балансу набуває вигляду:

$$dQ = dQ_{рез} + dQ_{втр},$$

В рівнянні $dQ_{рез} = mcdT$. Так як представлено температурою, що надходить до резервуара, за деякий проміжок часу dt .

Втрати представлені $dQ_{втр} = k(T - T_{сер})dt$, що являє собою втрати температури в резервуарі за деякий проміжок часу dt .

Отримаємо рівняння:

$$Pdt = mcdT + k(T - T_{сер})dt,$$

Де m – маса резервуару

c – теплоємність резервуару

dT – зміна температури за деякий проміжок часу dt

$T_{сер}$ – температура навколишнього середовища

k – коефіцієнт розподілення тепла в навколишнє середовище

Після виконаних перетворень, рівняння приймає такий вигляд:

$$\frac{cm}{k} * \frac{dT}{dt} = \frac{P}{k} - (T - T_{сер})$$

Щоб отримати передавальну функцію, застосуємо наступне:

$$\tau = \frac{cm}{k} - \text{стала часу,}$$

$P = u$ - вплив керуючого пристрою на вході,

$T = y$ – вихідний сигнал,

$$k_{nigc} = \frac{1}{k} - \text{коефіцієнт підсилення}$$

Отримаємо рівняння:

$$\frac{u}{k} - y = \frac{cm}{k} * \frac{dT}{dt};$$

$$k_{nigc} - y = \tau \frac{dy}{dt};$$

$$k_{nigc} * u = \tau \dot{y} + y;$$

Використовуючи перетворення Лапласа, після чого здійснюємо математичні перетворення:

$$k_{nigc} * U(s) = \tau s Y(s) + Y(s);$$

$$k_{nigc} * U(s) = Y(s)(\tau s + 1);$$

$$\frac{k_{nigc}}{(\tau s + 1)} = W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)};$$

Тепер в нас є передавальна функція $W(s)$. Використовуючи параметри що нам відомі. Об'єм резервуару, маса поживного розчину (вода та добрива).

$$\text{Об'єм резервуару } V_{рез} = 0,2 \text{ м}^3$$

$$\text{Маса води } m_{Вог} = 15 \text{ кг}$$

$$\text{Маса добрива } m_{доб} = 0,3 \text{ кг}$$

$$\text{Теплоємність води } c_{вод} = 4,2 \text{ кДж/кг}$$

Теплоємність добрив $c_{\text{доб}} = 3,2 \text{ кДж/кг}$

Стала часу дорівнює:

$$\tau = \frac{mc}{k} = \frac{63960}{k}$$

Беремо коефіцієнт теплообміну на 1 Вт/с при коефіцієнті теплопередачі, передаточна функція для нагрівачу наступна

$$W(s) = \frac{0,76}{63960s + 1}$$

Тоді для датчика температури

$$W_d(s) = \frac{k_d}{T_d p + 1}$$

k_d – коефіцієнт передачі нагрівача

T_d - постійна часу

$$W_H(p) = \frac{0,73}{30p + 1}$$

Будуємо схему в MATLAB

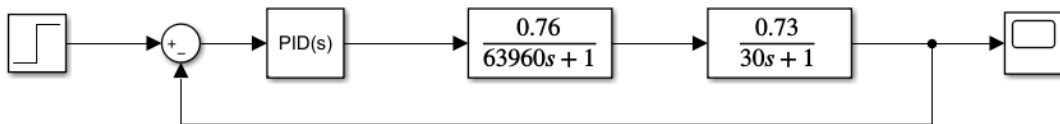


Рисунок 18 – Побудована схема в MATLAB



Рисунок 19 – Графік при не налаштованому ПІД регулятору

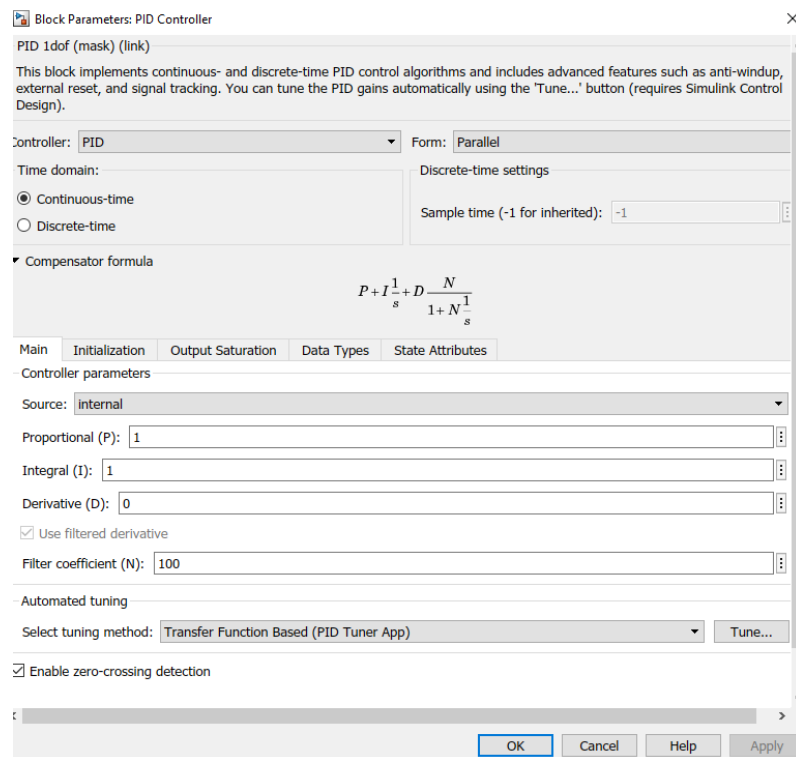


Рисунок 20 – Параметри ПІД регулятора

Як можна помітити, дуже значне перерегулювання, час нагрівання становить приблизно 5 хвилин. Далі я настроюватиму під регулятор, щоб зменшити перерегулювання.

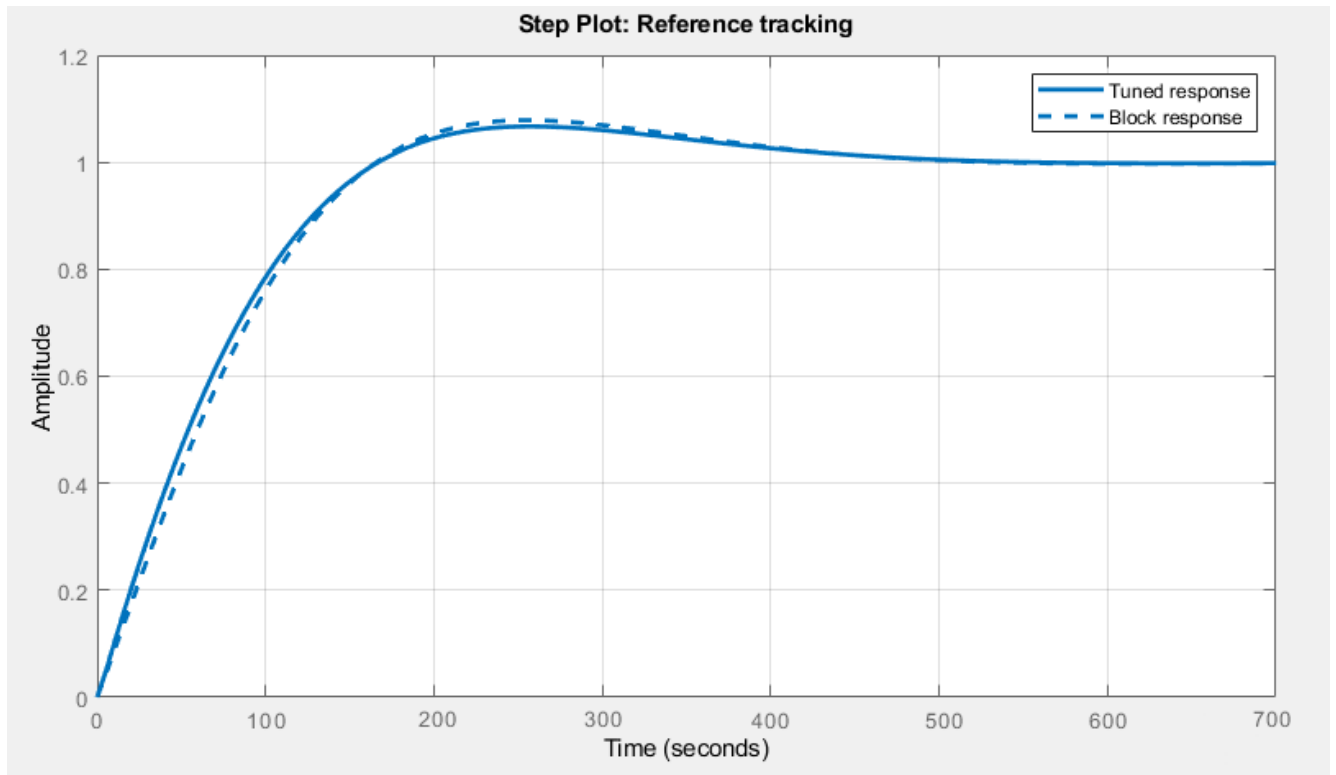


Рисунок 21 – Використання Tune для підстройки регулятора

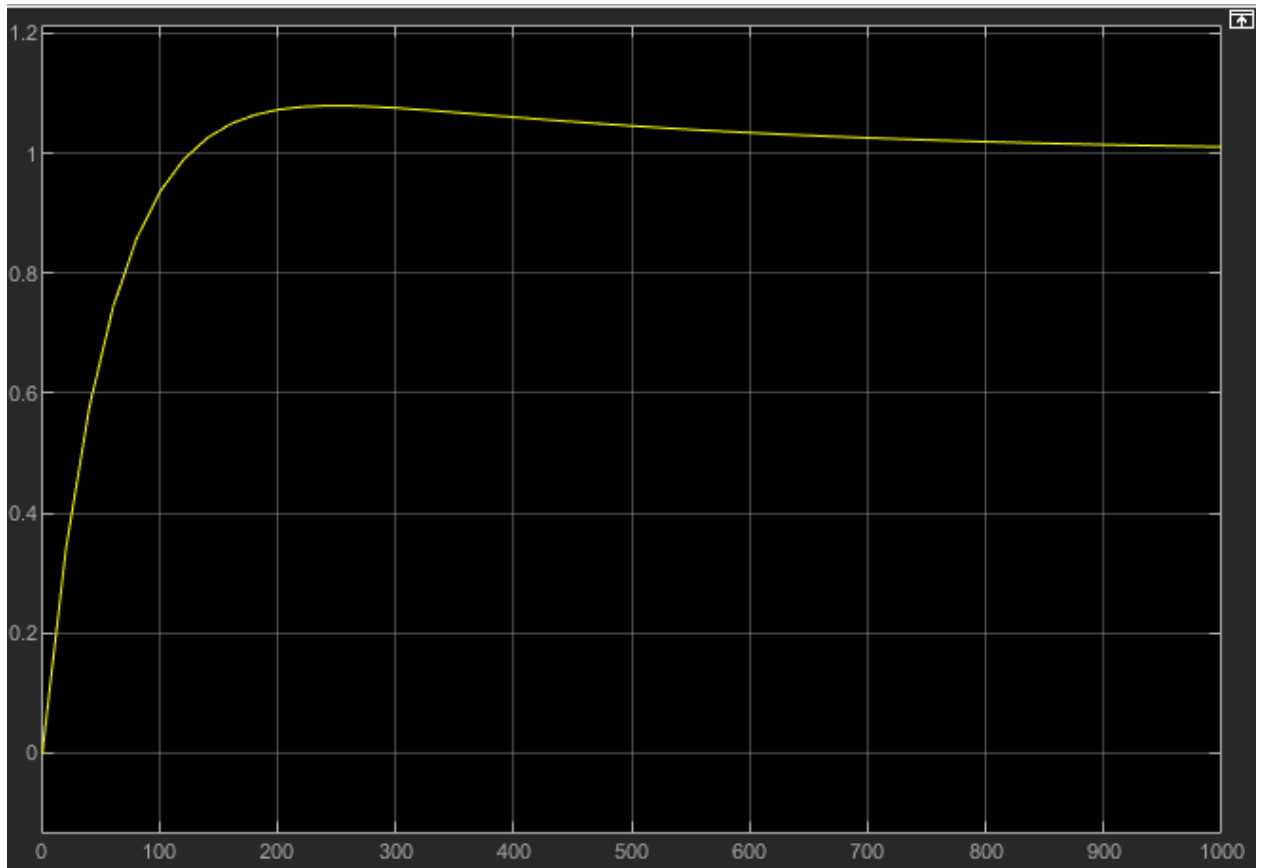


Рисунок 22 - Графік при налаштованому ПІД регулятору

При настройці перенагрів не значний, тому я вважаю, що можна зупинитися на цьому

3.2 Контроль обприскування системи аеропоніки

Остання складова системи аеропоніки є обприскування коренів рослини, для подачі води та необхідних складових для їх росту. Система обприскування працює час від часу в залежності від стадії рослини, та вмикається по таймеру на деякий час.

Математична модель зміни тиску за методом аеропоніки наступна:

$$Qdt = dW_{1,2} = \mu\omega\sqrt{2g(H - (P + h))}dt$$

$$dHS_{1,2} = dW_{1,2}$$

Q – витрата рідини на виході;

μ – витрата розчину;

ω – площа поперечного перерізу;

$S_{1,2}$ - середня площа перерізу.

Знову приводимо до рівняння балансу

$$dHS_{1,2} = \mu\omega\sqrt{2g(H - (P + h))}dt$$

Далі визначимо рівняння, надходження води до резервуару з розчином

$$dQ = kS_{2,1}(y_{min} + h)dt$$

k – коефіцієнт швидкості зміни рівню

y_{min} - мінімальний рівень розчину в резервуарі

Так як основна частина води повертається в резервуар, візьму коефіцієнт 0.9. Також так як мінімальний рівень розчину не сильно відрізняється від максимального, то знехтуємо. За витрату візьмемо оптимальну витрату насоса для такого об'єму.

Отримаємо передаточну функцію насоса що накочує воду для розпилення

$$W(s) = \frac{0.3}{2460s + 1}$$

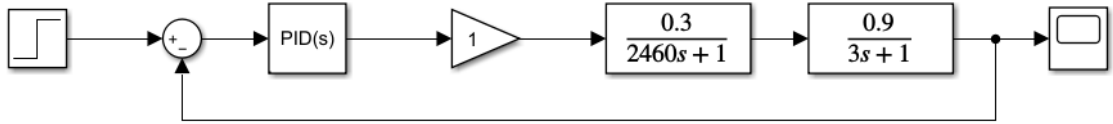


Рисунок 23 - Побудована схема в MATLAB

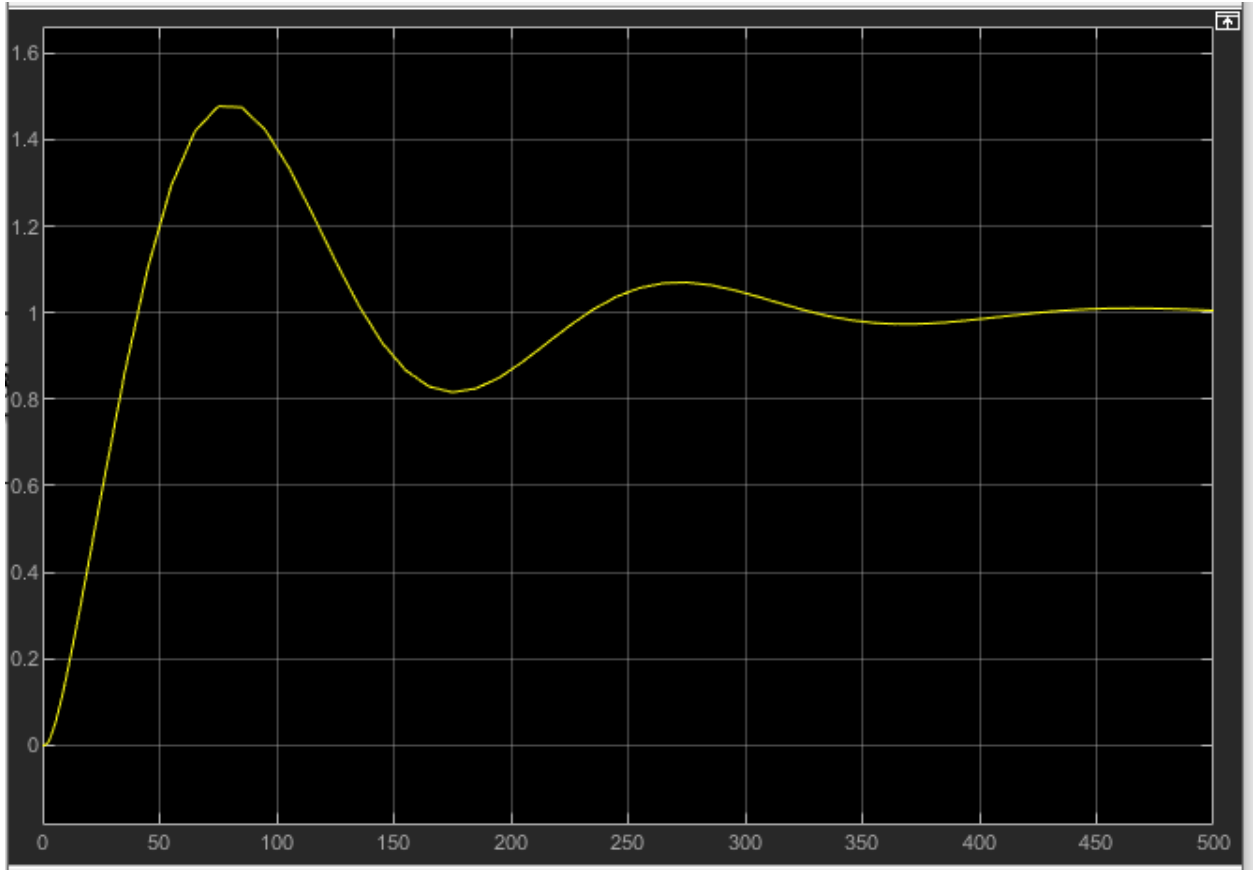


Рисунок 24 - Система без настройки ПІД регулятора

Як можемо помітити, система хоч і стабілізується, але спочатку значне перегулювання, тому ми наблизимо до оптимального рівня перегулювання.

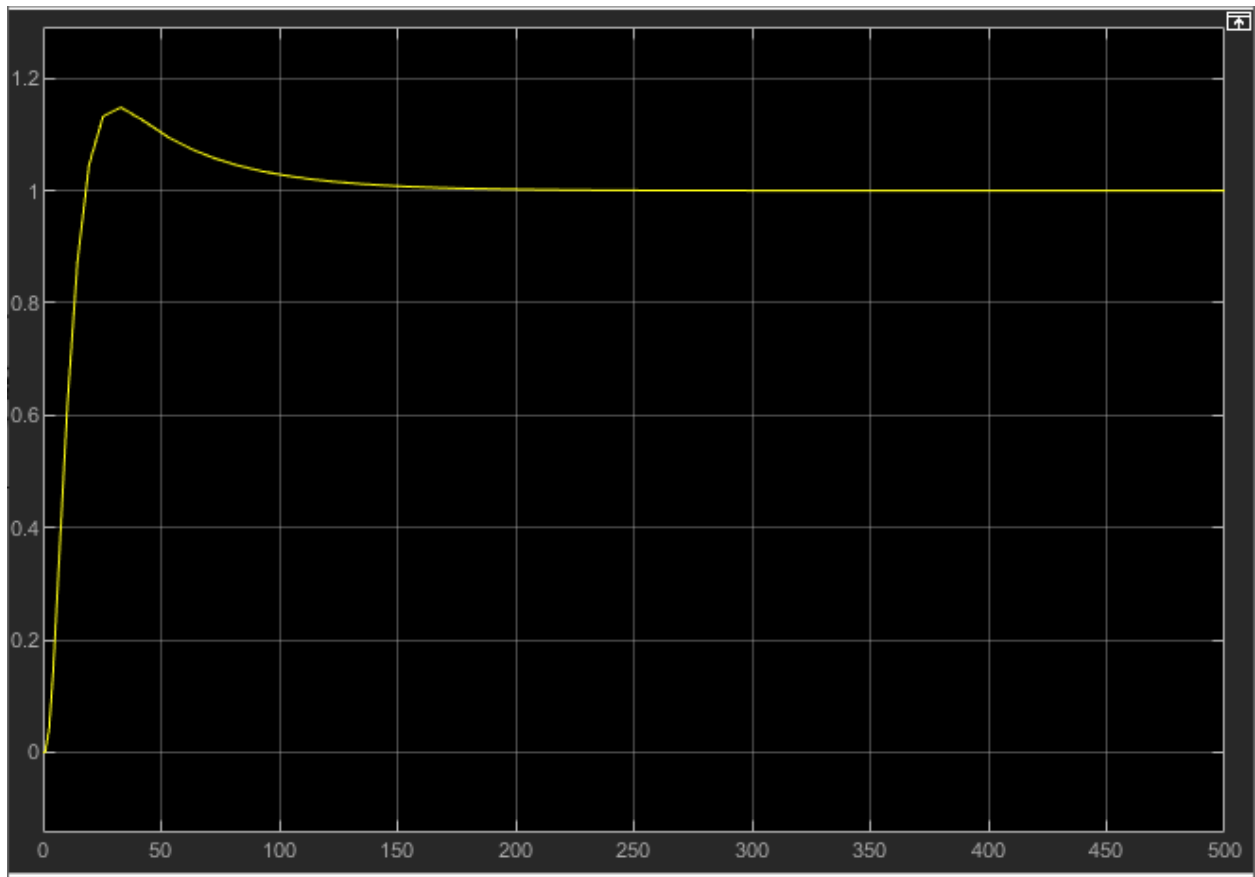


Рисунок 25 - Графік після настройки ПІД регулятора

РОЗДІЛ 4 SCADA СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОЩУВАННЯ МЕТОДОМ АЕРОПОНІКИ

Для автоматизованого керування системи аеропоніки, була розроблена SCADA система. Включає в себе всі контури що навів вище, а саме:

- Контур освітленості
- Контур підтримання температури
- Контур розпилення води на коріння
- Контур підтримання оптимального рівня CO₂

Також окремо згрупуую контури, що зв'язані з підготовкою розчину:

- Контур рівня рН та Ес
- Контур рівня концентрації речовин в розчині

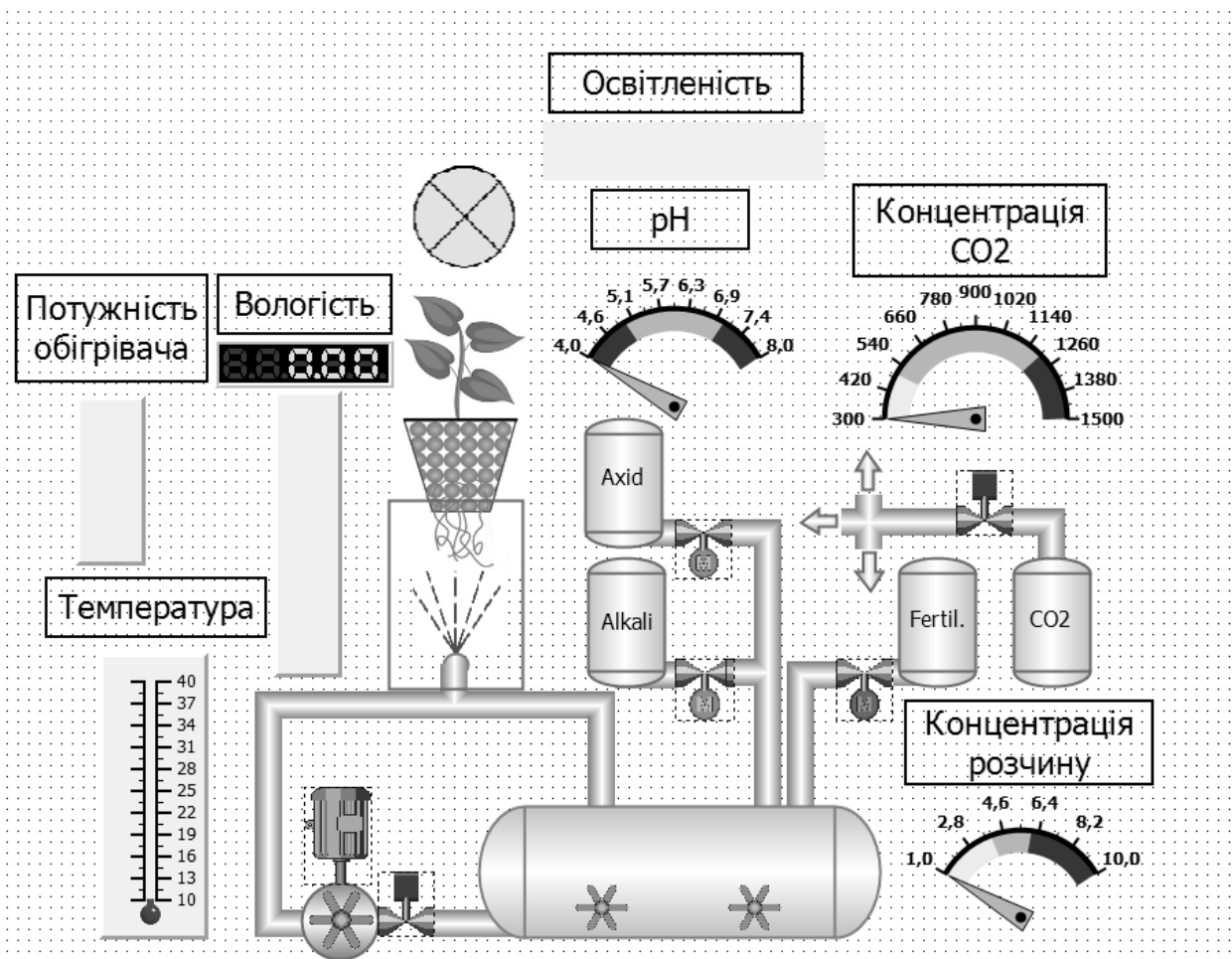


Рисунок 26 - Розроблена SCADA системи

4.1 Контур освітленості

В якості ресурсозбережного керування, я в контурі освітлення зробив взаємозв'язок освітлення навколишнього середовища, та потужності вирощувальних ламп, що використовуються в системі. Також не забуваючи, що рослинам також необхідна стадія сну. Тому в залежності від часу, лампа для вирощування буде вимикатись. А ось при похмурій погоді буде працювати, щоб надати рослинам обхідний рівень освітленості. Якщо погода дуже ясна, то можна зменшити потужність ламп, так як основну частину освітлення буде надавати природне освітлення.

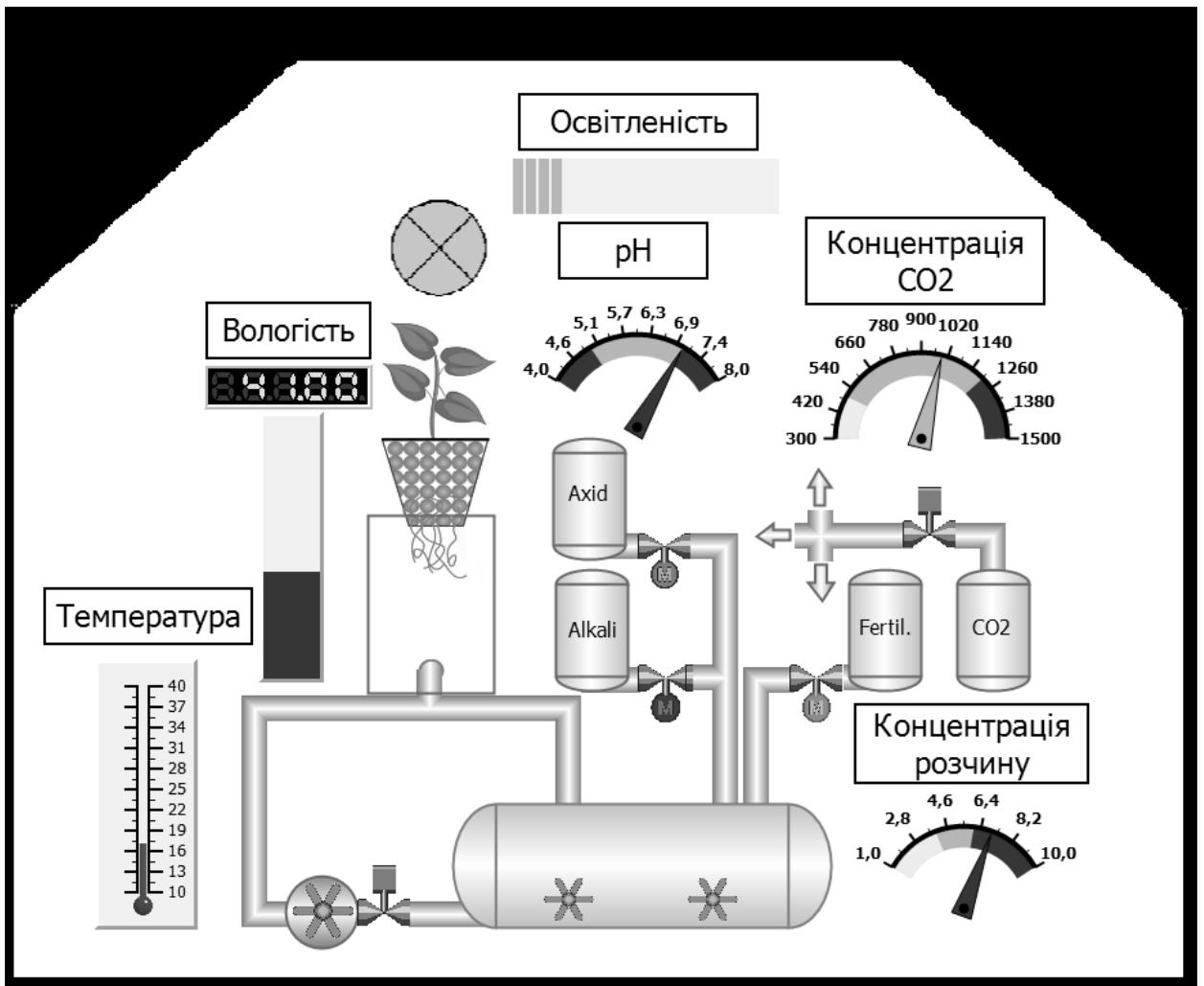


Рисунок 27 - Лампа ввімкнена при малій освітленості

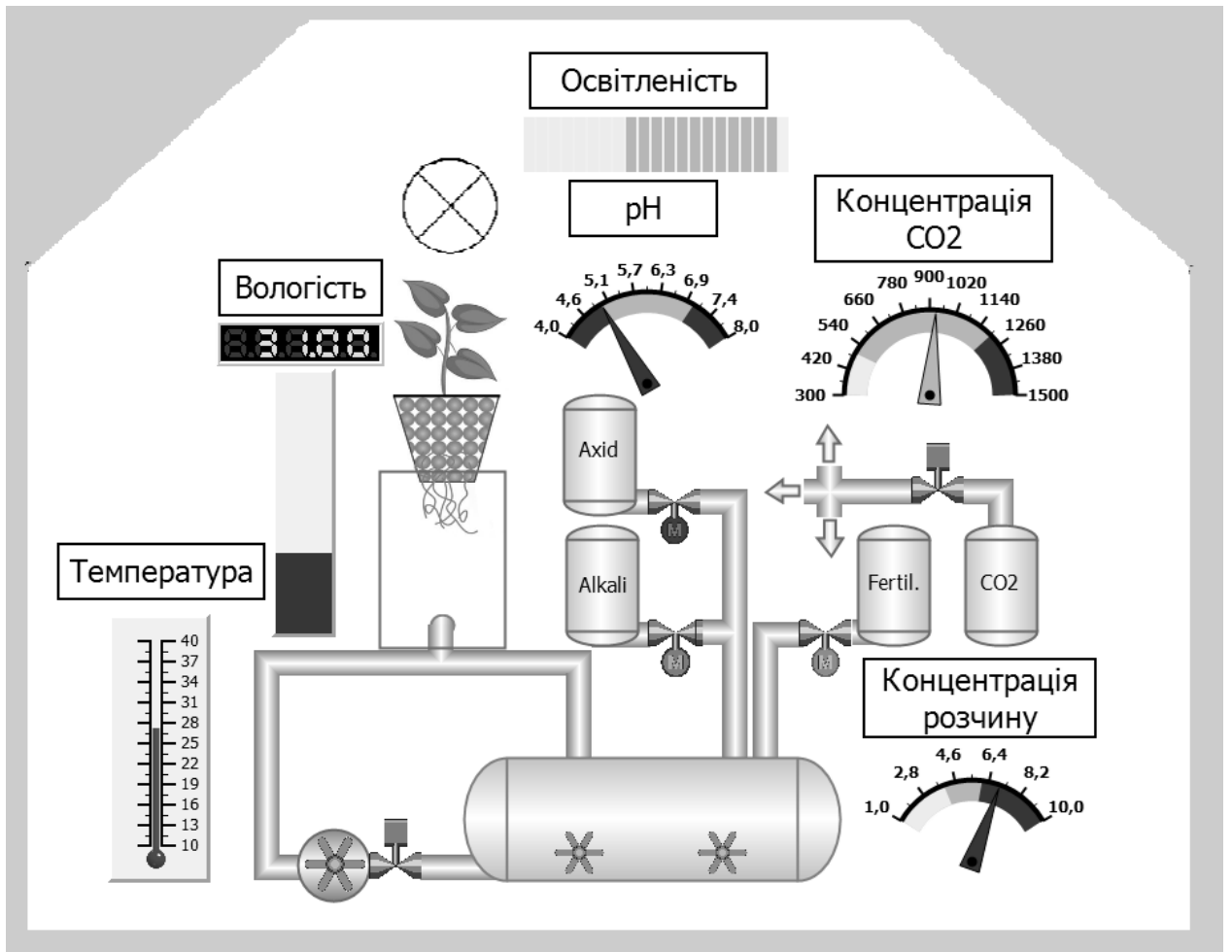


Рисунок 28 - Лампа вимкнена при достатній освітленості

4.2 Контур підтримання температури

Для оптимальної швидкості росту рослин, необхідно підтримувати задану температуру. Цей контур складається з датчика температури та обігрівача. В залежності від температури, обігрівач буде працювати на різній потужності. Також, можлива часткова зміна температури за рахунок контуру CO₂, але про це в самому контурі.

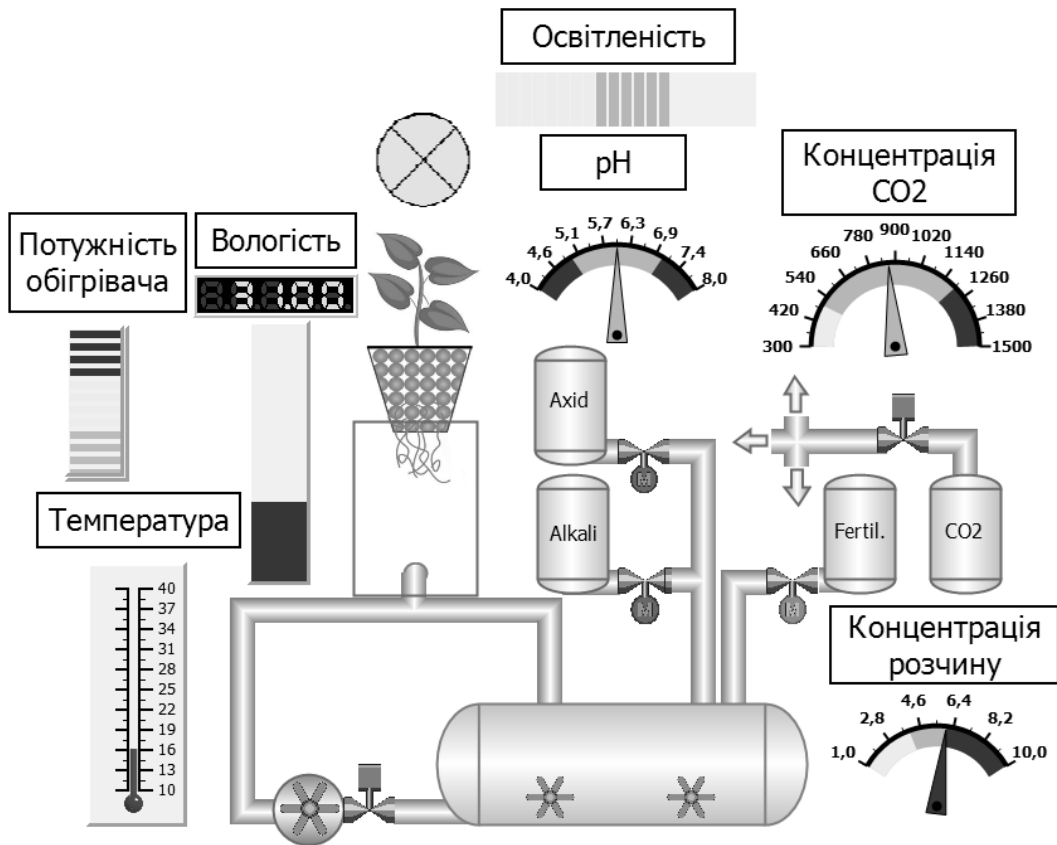


Рисунок 29 - При недостатній температурі, потужність нагрівача висока

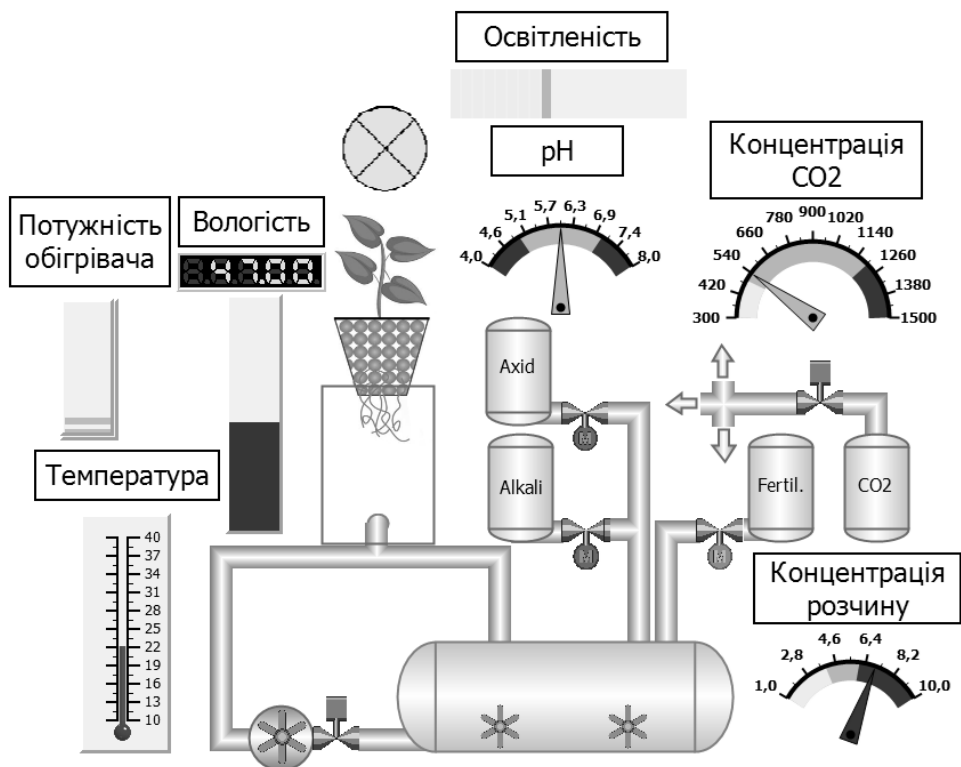


Рисунок 30 - При достатній температурі, потужність нагрівача низька

4.3 Контур підтримання оптимального рівня CO₂

Для найшвидшого росту рослини, а значить і підвищення ефективності, що також собою являє ресурсозбережною дією. Чим швидше виросте рослина, тим менше потрібно прикласти ресурсів, на всьому проміжку вирощування.

Даний контур являє собою датчик концентрації CO₂ в повітрі, а також запірної арматури до балону з CO₂. Також опосередковано включає в себе контур температури, так як при адіабатичному розширенні газу, поглинається енергія, тобто знижується температура. Також, використовуючи це фізичне явище, можна зменшувати температуру, ціною підвищення концентрації CO₂, але там достатній «безпечний» проміжок, щоб це не сильно впливало на швидкість росту.

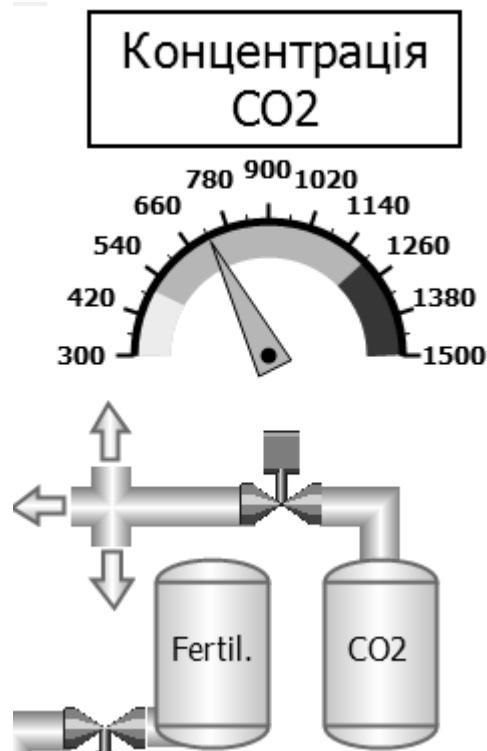


Рисунок 31 - Скада контур концентрації CO₂

4.4 Контур рівня рН

Для правильного росту рослин, необхідно підтримувати оптимальний рівень рН. Це реалізовано двома резервуарами з розчинами кислоти та лугів відповідно. Також, для оптимального розчину в середині готового розчину – встановлені гвинти що перемішують розчин, також що дозволяє уникнути застоєння води.

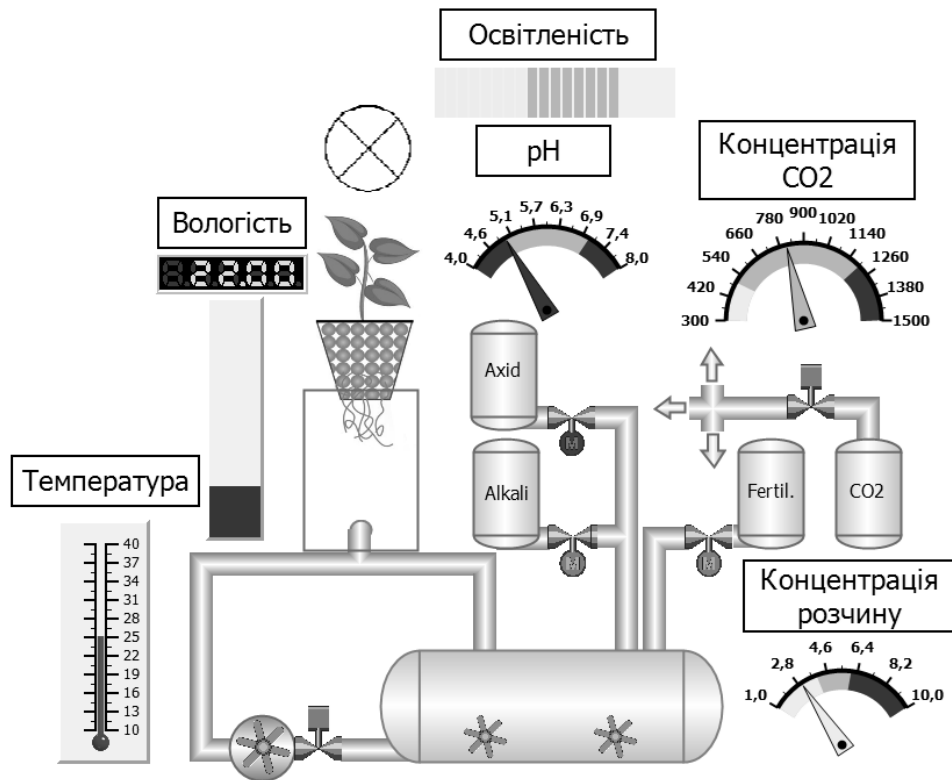


Рисунок 32 - При кислотному рН відкривається запірні арматура від резервуару з розчином лугів

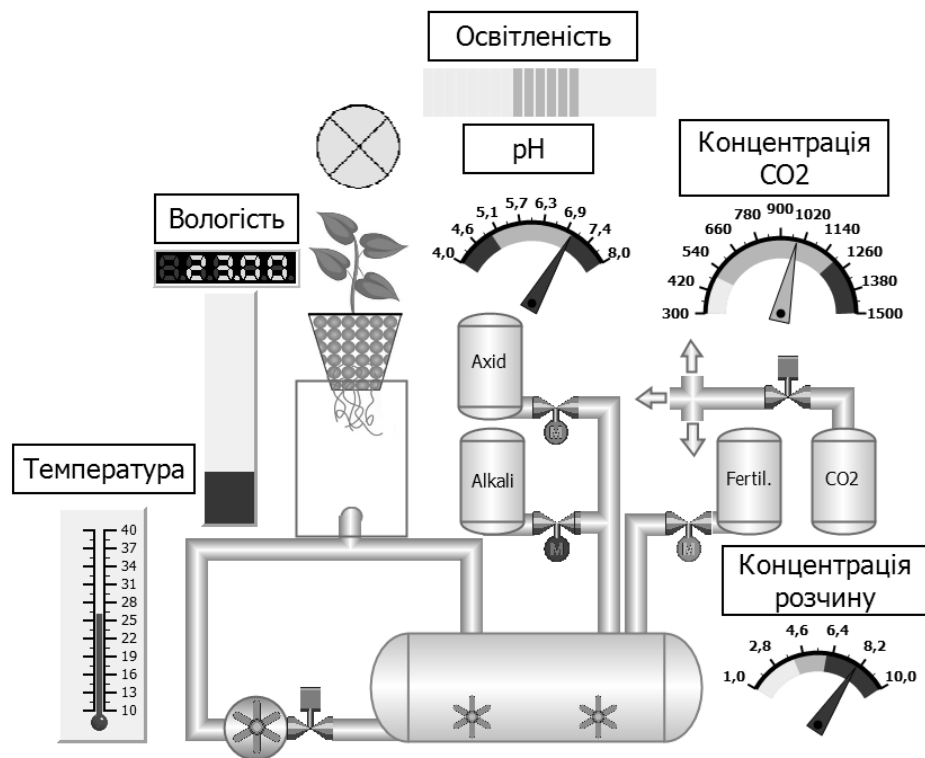


Рисунок 33 - При лужному рН відкривається запірна арматура від резервуару з розчином кислоти

4.5 Контур рівня концентрації речовин в розчині

При рості рослин, вони потребують все більше концентрацію добрив, тому необхідно з часом додавати, в моєму рішенні, з резервуару з концентрованим розчином, а гвинти для перемішування зрівняють концентрацію в основному резервуарі.



Рисунок 34 - При недостатньому рівні, відкривається запірна арматура до концентрованого розчину добрив



Рисунок 35 - При оптимальному рівні, закривається запірна арматура до концентрованого розчину добрив

4.6 Контур розпилення води на коріння

Система вирощування рослин методом аеропоніки, являє собою періодичне обприскування коріння рослин поживним розчином. При подальшому розвитку рослини, вона буде потребувати більше неорганічних сполук, тому від програмованого таймера, буде вмикатись система розпилення, що складеться з насоса та форсунки. Датчик вологості виступає в ролі відстеження роботи контуру. При виведені з ладу, буде помітно, якщо в час розпилення, вологість не буде збільшуватись.

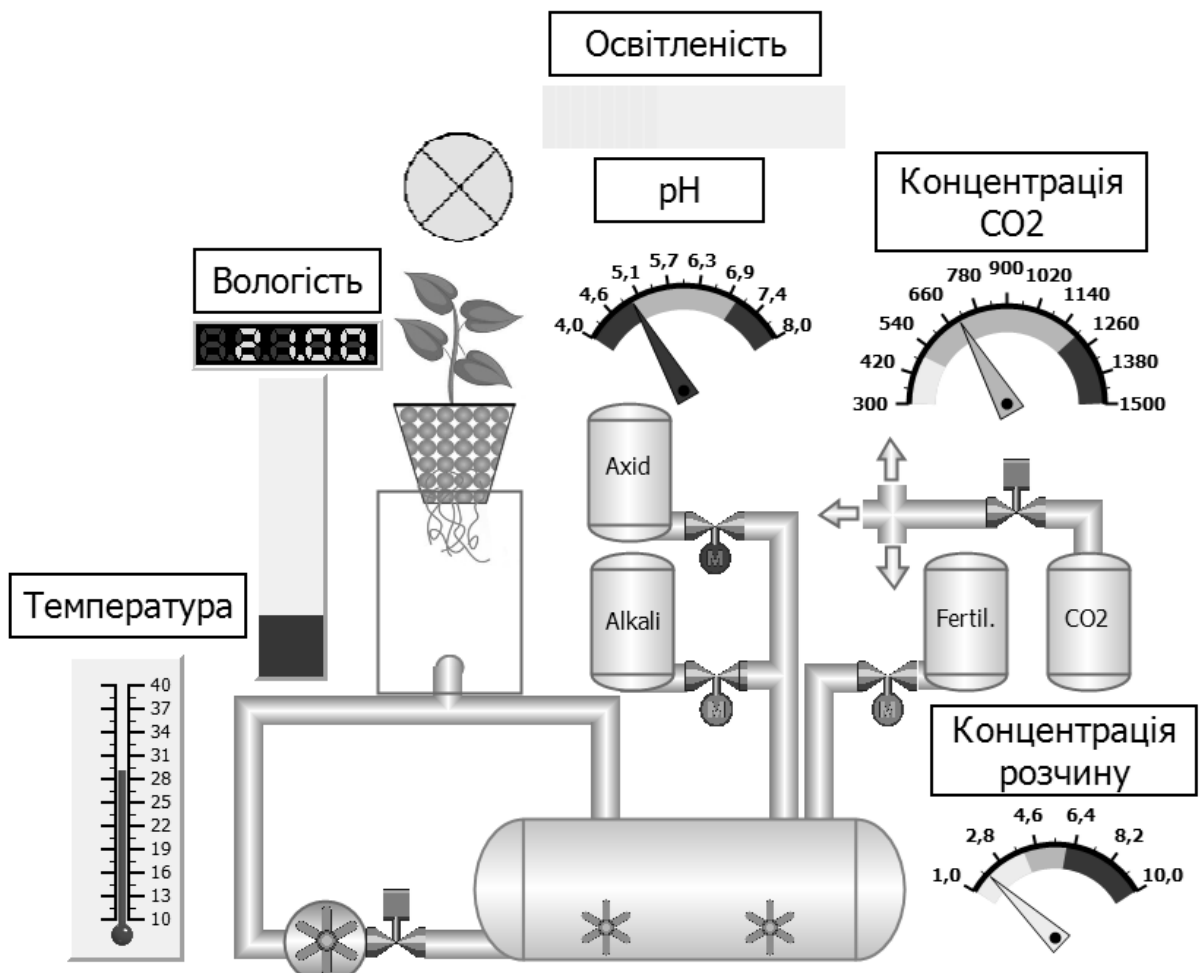


Рисунок 36 - Низька вологість в період відсутності обприскування

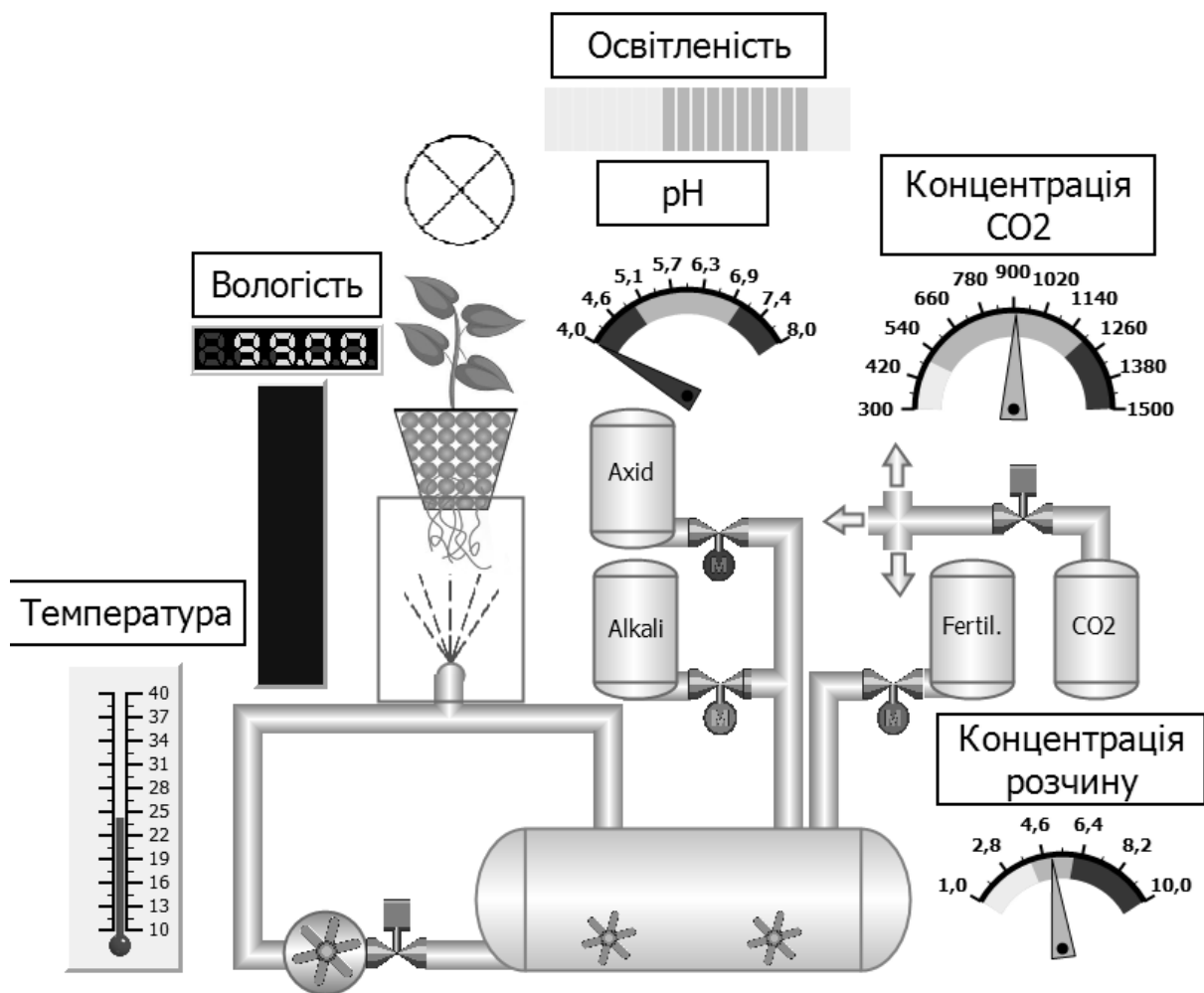


Рисунок 37 - Висока вологість в період обприскування

ВИСНОВОК

Представлені переваги та недоліки системи аеропоніки в порівнянні з іншими способами вирощування.

Показані принципи аеропоніки, алгоритми автоматизації.

Оптимізовані процеси керування за рахунок розроблених схем автоматизації та контурів керування.

Настроєний ПІД регулятор після проведених математичних розрахунків та моделювання MATLAB.

Автоматизована система керування на представленій SCADA системі.

Список використаних джерел

1. Fully Automated Hydroponic System for Indoor Plant Growth .2018. Vaibhav Palande, Adam Zaheer, and Kiran George с. 487
2. Automated Hydroponics System. Chris Lopez, Luiz Alves, Jarrod Pearman, Hardik Patel. 2020. с.18
3. Aeroponics project to unlock greenhouse production barriers / URL: <https://www.lettusgrow.com/blog/aeroponic-rolling-benches-for-greenhouse-productivity> (дата звернення: 05.12.2023)
4. What Is Aeroponics Farming & Why You Should Care? / URL: <https://medium.com/krishi-wise/what-is-aeroponics-farming-why-you-should-care-238617517711>(дата звернення: 05.12.2023)
5. Aeroponic Farming: Growing potatoes in thin air can raise your profits to 20 percent/ URL: <https://cipotato.org/inthenews/aeroponic-farming-growing-potatoes-thin-air-raise-profits-20-percent/>(дата звернення: 05.12.2023)
6. Smart Indoor Farms: Leveraging Technological Advancements to Power a Sustainable Agricultural Revolution. 2021. Anirban Jyoti Hati. Rajiv Ranjan Singh с. 734
7. Growth Responses and Root Characteristics of Lettuce Grown in Aeroponics, Hydroponics, and Substrate Culture. 2018. Li, Q.; Li, X.; Tang, B.; Gu, M. с. 4
8. Monitoring and Control Systems in Agriculture Using Intelligent Sensor Techniques: A Review of the Aeroponic System. J. Sens. 2018, Lakhari, I.; Jianmin, G.; Syed, T.; Chandio, F.; Buttar, N.; Qureshi, W. с. 4-6

9. “Aeroponic greenhouse as an autonomous system using intelligent space for agriculture robotics,” in Robot Intelligence Technology and Applications 2. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 274, J. H. Kim, E. Matson, H. Myung, P. Xu, and F. Karray, Eds., 2014. M. Pala, L. Mizenko, M. Mach, and T. Reed, c. 83–84
10. “Aeroponics growth system wireless control system and method of using,” US Patent 20160021836A1, 2016. K. Kernahan and C. A. Cupertino
11. “Automated aeroponics system using IoT for smart farming,” in 8th International Scientific Forum, ISF 2017, UNCP, USA, S. C. Kerns and J. L. Lee. c. 108-109
12. Greenhouse Carbon Dioxide Supplementation / URL: <https://extension.okstate.edu/fact-sheets/greenhouse-carbon-dioxidesupplementation.html> (дата звернення: 05.12.2023)
13. Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. J. Plant. Interact. 2018 Lakhari, I.; Gao, J.; Syed, T.; Chandio, F.; Buttar, N.
14. What is Aeroponics? / URL: <https://www.nosoilsolutions.com/aeroponics/> (дата звернення: 07.12.2023)
15. A smart aeroponic system for sustainable indoor farming. Benedetta Fasciolo, Ahmed Awouda, Giulia Bruno, Franco Lombardi. 2023. c. 637