

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
бакалавра

на тему: **Комп'ютеризована система вимірювання та контролю
параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці**

Виконав: студент 4 курсу, групи МТ-4

Спеціальності: 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

Омельчук Х.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: _____

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальної техніки
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент _____ Омельчук Христина Петрівна

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання та контролю
параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ, кандидат технічних наук, доцент
Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 4 » квітня 2025 р. № 131/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт контролю - комп'ютеризована ситема вимі-
вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування
суниці, параметр вимірювання – температура та вологість, рівень освітлення
та концентрація CO₂.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)
Огляд та аналіз існуючих комп'ютеризованих систем вимірювання та контролю
параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці, розробка
структурної та принципової схеми, розробка алгоритму, розрахунки параметрів
комп'ютерозованої системи, моделювання системи, розрахунок метрологічних
похибок, оцінка показників надійності, безпека життєдіяльності та охорона
праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень)
структурна схема, функціональна схема, перелік елементів, принципова схема,
блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
2	Аналіз технологій вирощування суниці	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
3	Розробка структурної схеми	16.03.25 – 15.04.25	Виконано
4	Розробка принципової схеми	16.04.25 – 24.04.25	Виконано
5	Розробка алгоритму роботи системи	25.04.25 – 09.05.25	Виконано
6	Розрахунки параметрів комп'ютеризованої системи	10.05.25 – 24.05.25	Виконано
7	Моделювання системи	25.05.25 – 03.06.25	Виконано
8.	Розрахунок алгоритму та метрологічних характеристик	04.06.25 - 15.06.25	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	03.06.25 – 17.06.25	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Омельчук Х.П.

(прізвище та ініціали)

Чепюк Л. О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі розроблено систему комп'ютеризовану систему вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці, яка спрямована на підвищення ефективності використання фізичної праці, водних і енергетичних ресурсів під час вирощування сільськогосподарських культур в Україні.

Розроблена система забезпечує контроль над температурою та вологістю повітря і рівнем освітлення у теплиці. У якості основи проекту використовується друкована плата Arduino Mega. Схема проекту була побудована в системі Microsoft Office Visio, для розробки програмної частини проекту використовувалось інтегроване середовище розробки Arduino IDE.

ABSTRACT

In this qualification work, a computerized system for measuring and controlling microclimate parameters in a greenhouse for growing strawberries has been developed which is aimed at increasing the efficiency of the use of physical labor, water and energy resources during the cultivation of agricultural crops in Ukraine.

The developed system provides control over the temperature and humidity of the air and the level of lighting in the greenhouse. The Arduino Uno printed circuit board is used as the basis of the project. The project scheme was built in the PROTEUS VSM system, the Arduino IDE integrated development environment was used to develop the software part of the project.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою в обсязі 70 сторінок формату А4, записка містить вступ, основну частину, що складає 10 розділів, висновки, список використаних джерел та додатків. Темою роботи є розробка комп'ютеризованої системи вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці

Перший розділ містить основні завдання та вимоги до виробу, а саме підстави до розробки ціль та призначення розробки, вимоги до програмного забезпечення.

Другий розділ містить загальний огляд на біологічні особливості вирощування суниці та її проблеми вирощування в Україні, розглянуто існуючі комп'ютеризовані системи вирощування суниці, фактори проектування системи та аналіз параметрів мікроклімату в теплиці.

Третій розділ містить розроблену структурну схему комп'ютеризованої системи.

Четвертий розділ містить опис засобів реалізації системи на основі якої розроблено принципову схему.

П'ятий розділ містить огляд на розроблені алгоритми роботи комп'ютеризованої системи.

Шостий розділ містить розрахунки параметрів комп'ютеризованої системи а саме додаткового освітлення, збагачення CO_2 , контролю температури та вологості.

Сьомий розділ містить моделювання системи а саме моделювання процесу контролю температури та вологості

Восьмий розділ містить розрахунок похибок вимірювання та метрологічні характеристики.

Дев'ятий розділ містить розрахунок надійності приладу, графічно зображено залежність безвідмовної роботи виробу протягом часу.

Останній розділ містить інформацію щодо безпеки та охорони праці

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	8
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	9
1.1 Найменування та область використання.....	9
1.2 Підстава для розробки.....	9
1.3 Ціль та призначення розробки.....	9
1.4 Вимоги до розробленого продукту	9
1.5 Вимоги до програмного забезпечення	10
1.6 Вимоги до надійності.....	10
2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ.....	11
2.1. Походження і сільськогосподарська цінність суниці.....	11
2.1.1. Біологічні особливості суниці.....	11
2.1.2. Потенціал і проблеми вирощування суниці в Україні.....	12
2.2. Методи вирощування суниці з застосуванням високих техно- логій в управлінні параметрами мікроклімата.....	13
2.3. Огляд на комп'ютеризовані системи вирощування суниць.....	14
2.4. Фактори проектування системи вирощування суниці.....	18
2.5. Аналіз параметрів мікроклімата в теплиці вирощування суниці.....	20
2.5.1. Освітлення.....	20
2.5.2. Контроль температури, вологості та вентиляції.....	20
2.5.3. Збагачення CO ₂	21
2.6. Висновки до розділу.....	22
3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....	23

					MIMB.420.007.008-ПЗ						
Вим	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Омельчук Х.П.			Комп'ютеризована система вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці			Лім.	Лист	Листів	
Перевір.		Чепюк Л.О.							6	105	
Реценз.								Державний університет «Житомирська політехніка», гр. МТ-4			
Н. Контр.		Чепюк Л.О.									
Затверд.		Подчашинський Ю									

	стор
4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....	25
4.1. Вибір засобів реалізації системи.....	25
4.2. Альтернативи при розробці	33
4.3. Розробка функціональної та принципової схеми.....	33
5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	35
6. РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ.....	38
6.1. Розрахунки параметрів комп'ютеризованої системи.....	38
6.2. Система додаткового освітлення.....	39
6.3. Система контролю температури і вологості повітря.....	40
6.4. Система збагачення CO ₂	49
6.5. Висновки до розділу.....	49
7. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ.....	50
7.1. Моделювання процесу контролю температури та вологості.....	50
7.2. Пропозиція щодо конструкцій теплиці.....	58
7.3. Проектування 3Д-моделі системи-теплиці.....	59
7.4. Висновок до розділу	60
8. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ	61
9. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ.....	63
10. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	67
ВИСНОВКИ	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТКИ	78

ВСТУП

У сучасному світі комп'ютеризовані системи відіграють дуже важливу роль в майже в усіх сферах життя. Навіть в сільському господарстві. Комп'ютеризовані системи вирощування рослин можна зекономити людські сили та час а головне зменшити витрати водних та енергоресурсів, добрив. Наразі людством створено багато рішень даної проблеми і на цьому розвиток технологій не зупиняється.

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження комп'ютеризованих систем вимірювання та контролю мікроклімату в теплиці вирощування садових суниць (далі - суниця) .У процесі виконання кваліфікаційної роботи передбачається вирішення наступних завдань:

- зробити огляд на характеристики суниці;
- провести аналіз існуючих рішень у цій сфері, визначити їх принципи роботи, переваги та недоліки;
- дослідити сучасні технології, які можуть бути використані для створення подібних систем, і на основі отриманої інформації обґрунтувати вибір відповідних інструментів для розробки;
- спроектувати архітектуру власної системи автоматизованого догляду;
- продемонструвати роботу системи.

Об'єктом дослідження дипломної роботи є комп'ютеризований система догляду за суницями, а предметом дослідження – вимірювання та контроль параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування.

Після опрацювання базових теоретичних засад у сфері автоматизованого догляду за суницями стане можливим перейти безпосередньо до проєктування власної системи. Визначивши ключові вимоги до її функціонування, можна сформулювати поетапний план розробки. Дотримуючись цього плану, поступово буде реалізовано систему, здатну забезпечити ефективну автоматизацію процесів догляду за рослинами..

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1 Найменування та область використання

Система призначена для вимірювання температури та вологості повітря, рівень освітленості та концентрації CO₂ в теплиці для вирощування суниці. Область застосування: вирощування сільськогосподарський культур.

1.2 Підстава для розробки

Комп'ютеризоване штучне середовище для вирощування рослин дозволяє нам збирати врожай круглий рік не зважаючи на навколишнє середовище (температура, освітлення, вологість). В холодні пори року ми стикаємось з такими труднощами як недостатня кількість поживних речовин, відсутність добрив, надмірна або низька вологість це все призводить до поширення різних хвороб рослин. Наприклад гіповітаміноз (недостатня кількість вітамінів), або взагалі авітаміноз (відсутність вітамінів). Нажаль через це все ми отримаємо маленький врожай або взагалі його відсутність. Але рішення є! Для покращення врожаю, а також щоб уникнути хвороб і шкідників у будь-який період року можна використовувати комп'ютеризовані теплиці.

1.3 Ціль та призначення розробки

Метою даного проекту є розробка системи комп'ютеризованої система вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці задля підвищення врожаю.

1.4 Вимоги до розробленого продукту.

1.4.1. Об'єкт контролю – комп'ютеризована система вимірювання та контролю

1.4.2. Параметр вимірювання – температура та вологість повітря, рівень освітленості та концентрація CO₂

Контроль за температурою повітря:

1.4.3. Діапазон вимірювання температури повітря -40 °C ...-125 °C

1.4.4. Похибка вимірювання температури повітря ±0.2 °C

Контроль за вологістю повітря:

1.4.5. Діапазон вимірювання вологості повітря - 0% RH ... +100% RH

1.4.6. Похибка вимірювання вологості повітря ±2 RH

Контроль за рівнем освітлення:

1.4.7. Діапазон вимірювання рівня освітленості 0 ... 65535

1.4.8. Похибка вимірювання рівня освітленості $\pm 2\%$

Контроль за рівнем концентрації CO₂:

1.4.9. Діапазон вимірювання рівня концентрації CO₂ 400 ppm ... 65000 ppm

1.4.10. Похибка вимірювання рівня концентрації CO₂ ± 100 ppm

1.5 Вимоги до програмного забезпечення

- Операційна система Windows, macOS / Linux;
- Інтегроване середовище розробки Arduino IDE

1.6 Вимоги до надійності

Система є що відновлюється, не резервується, ремонтпридатною.
Наробіток на відмову складає не менше 25000 годин.

2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ

2.1 Походження і сільськогосподарська цінність суниці

Суниця садова, що широко вирощується в даний час є алооктоплоїдом ($2n=56$) і є селекційним шедевром, що виник у Європі приблизно в першій половині 18 століття. Яка утворилася в результаті схрещування рослин *F. chiloensis*, яку привезли з Чилі, та прилеглих рослин *F. Virginiana*, привезених з Атлантичного узбережжя Америки. Саме ці гібриди є родичами наших сучасних сортів суниці [1].

Назараз суниця широко вирощується в багатьох країнах світу і є культурою з високою економічною цінністю. Згідно результатам дослідження [2, 3], об'єм світового ринку суниці до 2019 року склав 17,7 мільярдів доларів США і досяг майже 19 мільярдів доларів США до 2021 року. По прогнозам ринок продовжуватиме рости і дійде до 24 мільярдів доларів США до 2028 року.

Крім свіжої суниці, суничний джем і інші продукти з земляники також мають високу економічну цінність. Але після Covid-19 тенденції покупок змінилися, все більше уваги приділяється свіжим фруктам та овочам, включаючи суницю, які дуже корисні для здоров'я.

2.1.1 Біологічні особливості суниці

Біологічні особливості суниці представлені в джерелі[1].

Суниця – багаторічна трав'яниста рослина, займаючи проміжне положення між багаторічними трав'яними та напівчагарниковими формами. Суниця є світлолюбною рослиною. Висота рослини може досягати 40 см. Однак при вирощуванні висота рослин зазвичай становить 20-25 см.

В залежності від сорту молода укорінена розетка зазвичай має 1 або 2-3 ріжкив перший рік, а з роками розростається і утворює від 2-3 до 8-16 ріжків. Чим більше рослина утворює ріжків, тим більший врожай. Корінь утворюється в основі ріжок і формується коренева система у верхніх шарах ґрунту. Основні корені знаходяться на глибині 25-30 см. Тож рослина має високу потребу в

волозі та в поживних речовинах. Старіючі рослини потребують ще більше догляду.

В будь-який період свого розвитку найважливіше для суниці це вологість та поживні речовини. В жарку и суху погоду цвітіння швидше, а впрохолодну погоду цвітіння сповільнюється. Після опилення з'являються плоди, які теж залежать від погодних умов: в жарку погоду, плоди дозрівають швидко, а в холодну і дощову погоду, процес дозрівання може відбуватися до 30 днів і більше.

2.1.2 Потенціал і проблеми вирощування суниці в Україні [4]

Суниця садова – це світлолюбна рослина, вона добре росте за 12-14 годин світлового дня. В Україні для цього сприятливі умови, особливо у південних і центральних регіонах. Оптимальна температура для росту і плодів: +18...+25 °С. Навесні суниці витримують маленькі заморозки до -2 °С, головне щоб в цей час не було цвітіння. Влітку ситуація погана, температура вище +30°C можуть пригнічувати ріст і навіть псувати ягоди. Щодо вологості суниця любить середню вологість: 60-70% від повної вологоємності ґрунту. Під час дощів велика вологість призводить до розвитку гнилі та різних хвороб коренів. Дефіцит вологи призводить до маленьких ягідок, в'ялості рослини або до гибелі. Тут допоможе крапельне зрошення.

Але є і проблеми з вирощуванням суниць в Україні такі як:

1) Зміна клімату та нестабільні погодні умови

- Часті посухи(особливо на Півдні та Сході).
- Поширеність весняних заморознів які шкодять квітам та призводять до зменшення врожаю.

2) Непридатні умови у певних регіонах

- У північних областях (Полісся) можу не вистачати сонячних днів та тепла.
- У Карпатах несприятлива підвишена вологість – призводить до грипкових захворювань.

3) Вологість повітря

- Якщо вологість понад 80% зростає ризик появи гнилі.
- У сухому повітрі (менше ніж 40%) під час цвітіння суниці знижується запилення.

Але вихід є! Використання технологій по вирощуванню суниці в Україні може повністю розширити масштаби і покращити якість, щоб конкурувати з постачанням з іншими країнами.

2.2 Методи вирощування суниці з застосуванням високих технологій в управлінні параметрами мікроклімата.

Сучасні методи вирощування суниці можна поділити на різні види: гідропоніка (суницю вирощують в штучному середовищі, наприклад в кокосовому субстраті), аеропоніка (вирощується у повітря, а її коренева система обприскується туманом з поживними речовинами), вертикальне землеробство (вирощування у вертикальних системах, наприклад у вежах або модульних стелажах з комп'ютеризованим управлінням умовами), органічне землеробство, землеробство з використанням нових методів збирання врожаю і тд. [5]. Суницю вирощують в теплицях або в закритих спорудах з високотехнічними пристроями, які можуть регулювати параметри внутрішнього середовища.

Основною перевагою цього метода є те що ми можемо контролювати вплив факторів навколишнього середовища на рослини суниць, тим самим впливаючи на покращення врожайності і якість отриманої продукції.

Але є і недоліки цього метода це великі витрати: витрати на інфраструктуру, витрати на експлуатацію обладнання, витрати на технічне обслуговування, витрати на робітників, и т.д.

Загальна структурна схема сучасних систем управління мікро-кліматом теплиці зазвичай має вигляд, показаний на рис.2.1 В залежності від масштабу і конкретних бажаних цілей кожна система може мати свої коригування.

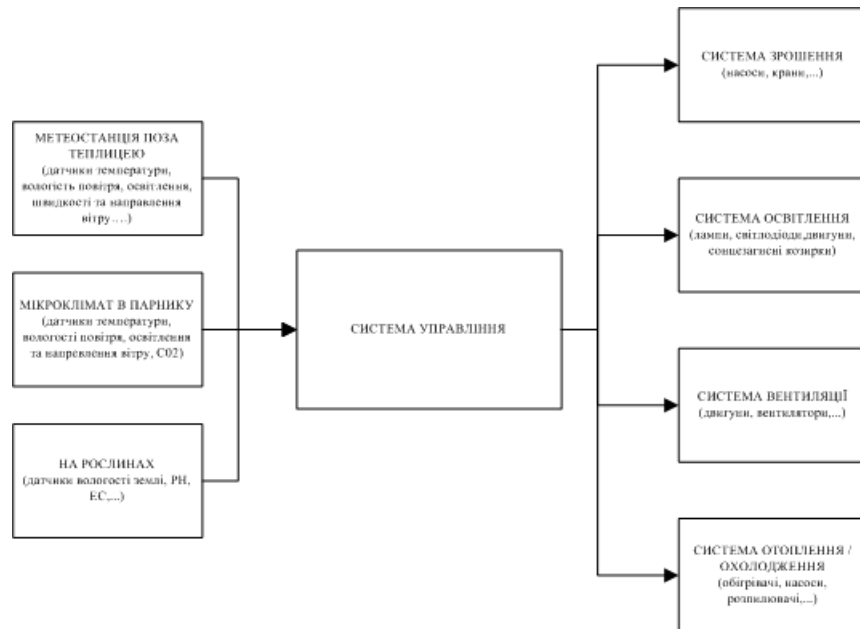


Рис.2.1 –Загальна структурна схема системи управління параметрами мікроклімата теплиці.

2.3 Огляд на комп'ютеризовану системи вирощування суниць

На даний момент в розвинутих країнах інвестується та розробляється з великими витратами комп'ютеризовані системи вирощування суниці в самих різних кліматичних умовах. Різниця між цими системами залежить від рівня інвестування і бажаної інвестором функціональності.

В якості приклада можна навести комп'ютеризовані системи вирощування NGS на піренейському півострові [6].



Рис.2.2 – Комп'ютеризована система вирощування суниці NGS.

Ця ідея дозволяє вирощування суниць під дашками, в тунелях або теплицях в субстрактах (з використанням кокоса, мінеральної вати и т.д.) Ця

технологія наразі вивчається в Польщі, на відміну від піренейського півострова де ця система активно використовується.

Зазвичай цю систему використовують в закритому ґрунті- в блокових тунелях шириною 8-8,5 м і висотою 3м. Рукави встановлюють на висоті 0,8 м, що економить простір. У таких тунелях розміщують мінімум 6 рядків рукавів з щільністю посадки 10 рослин на погонний метр.

Головним секретом такої технології є механізм з редуктором і двигуном, який рухає кожен другий рукав вертикально в протилежному напрямку до сусіднього. Тобто, коли один рукав піднімається, то сусідній опускається. Завдяки такому механізму в 8-метровому тунелі можна розмістити до 16 рядів. Це набагато збільшує врожайність. Під час збирання врожаю верхні ряди опускаються, тим сами спрощуючи доступ до суниці. Кожен такий рукав може досягати до 50 метрів. Це великий прорив у технологіях вирощування.

В якості другого приклада можна привести комп'ютеризовану систему вирощування компанії Wilkin & Sons Ltd. в Колчестері, Великобританії [7].



Рис.2.3 – Комп'ютеризована система вирощування суниці компанії Wilkin & Sons Ltd. в Колчестері, Великобританії

Комп'ютеризована система вирощування суниці компанії Wilkin & Sons Ltd. така як і в NGS. Звісно використання підвісних рукавів та

жолобів в повітрі з рухом несе в собі ризик виходу з ладу з великими пошкодженнями.

Аеропоніка



Рис. 2.4 – Приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу аеропоніки [8].

Також є дуже цікавий комп'ютеризований метод вирощування такий як аеропоніка. Цей метод, при якому суниця закріплена таким чином що її коренева система знаходиться у повітрі та отримує поживні речовини шляхом розпилення водного розчину, збагаченим мінеральними речовинами. При цьому розпилення не потрапляє на листя та стовбур. Перевагою такого методу є: економія ґрунту та захист від хвороб які поширюються там, економія ґрунту та води, економія простору що дозволяє збільшити вирощування. Також при використанні цього методу дозволяє вирощувати рослини у таких районах землі, як пустелля або тундра, які є непридатними для сільського господарства.

Недоліком аеропоніки можна вважати доволі складну систему встановлення, та великі фінансові витрати по причині необхідності купувати спеціальне обладнання.

Гідропоніка

Гідропоніка – спосіб вирощування рослин без ґрунту.

Він відрізняється від попереднього тим, що рослина отримує поживні речовини не від розпилення в повітрі а через водний розчин. При цьому рослина буде отримувати таку кількість поживних речовин, що буде достатньою для її нормального росту і розвитку.



Рис. 2.5 – Приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу гідропоніка [9].

Даний спосіб вирощування суниці більш простий та не вимагає багато зусиль і легко автоматизується. Так само як і аеропоніка він економічно використовує водні та енергетичні ресурси, а також не потребує роботи з бур'янами.

Більшість країн які розвивають комп'ютеризовані системи вирощування суниці розташовані в регіонах з помірним кліматом (США, Корея, країни Європи,...) тому головною метою є рішення проблеми з холодною погодою і снігом взимку, а також проблеми нерівномірного освітлення в період року.

Вертикальне землеробство

Вертикальне землеробство – це об'єднання з методом аеропоніки або гідропоніки, що дозволяє розташовувати суницю на стелажах, розташованими один над одним. Вертикальна ферма вимагає на 97% менше землі та до 90% менше води порівнянно з традиційним вирощуванням.



Рис.2.6 - Приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу вертикального господарства [10]

2.4 Фактори проектування системи вирощування суниці

Світло

Суниця – світлолюблива рослина. Ідеальним часом освітлення для рослин суниці становить 12-13 годин на добу [11]. Згідно дослідженням в джерелі [12], швидкість фотосинтеза рослин суниці досягає насичення при PPFD 400-600 мкмоль/(м² · с) . Окрім цього, для рослин суниці ранок до 11 годин є дуже важливим часом для стимуляції фотосинтезу [13].

Як країна з помірним кліматом, Україна має значну змінність тривалості дня – від 8-9 годин узимку до 16-17 годин улітку. Зальна кількість світла коливається в межах 1700-2300 годин на рік. Така тривалість природного освітлення є достатньою для вирощування суниці, однак в холодні пори року ми стикаємось з проблемою дефіцита світла, що може позначитися на рості і врожайності суниці. Враховуючи це для цілорічного вирощування потрібно встановити штучне освітлення, особливо в теплицях, щоб допомогти суниці отримати стабільний фотосинтетичний режим та сприятливі умови для розвитку суниці.

Температура і вологість повітря

Температура значно впливає на якість та кількість врожаю. Різке пониження або підвищення температури може знизити врожай на більше ніж 20%. При розробці системи треба врахувати що обов'язково потрібно підтримувати температуру на рівні 22-25 °C вдень и 10-12 °C вночі.

Низька вологість (45-55 %) значно знижує вагу плодів і врожайність. В умовах високої вологості (90 %) рослини суниці дають великі плоди, але кількість плодів зменшується. Найкраща вологість це 65-75 %, вона вважається оптимальною для суниці. Врожай та плоди суниці будуть великі та якісні [14].

Вітер

Для мікроклімата теплиці вітер це важливий фактор, який впливає на контроль інших факторів (температура та вологість). Окрім цього, для суниці вітер відіграє важливу роль в запиленні. Враховуючи це, в теплиці обов'язково повина бути гарна вентиляція.

Комахи, які допомагають обпилюванню

Суниця може повністю обпилюватися тільки вітром. Але суниця яка обпилюється бджолами має біліші плоди, мають більш насичений червоний колір який приваблює користувача, більший термін придатності, правильне відношення цукру та кислоти чим плоди які обпилюються вітром [15]. Тож звичайно потрібно подумати про проектування системи таким чином, щоб запилювачі, такі як бджоли мали вільний доступ до суниць.

Концентрація вуглекислого газу (далі CO₂)

Концентрація вуглекислого газу один із найважливіших факторів. Використання методу насичення CO₂ підвищує врожайність з 16 % до 40 % [16]. Концентрація CO₂ при насиченні повина підтримуватися на рівні 800 ppm [17].

2.5 Підходи до контролю параметрів мікроклімата в теплиці вирощування суниці

Тож система повина включати такі компоненти: освітлення, контроль температури, контроль вологості, вентиляція, подача CO₂ і т.д.

2.5.1 Освітлення

Додаткове освітлення уже давно використовується для покращення врожайності тепличних культур. Раніше використовувалось багато різних типів лампочок, таких як люмінесцентні лампи, лампи розжарювання, галогенні лампи і т.д. Однак все більше використовуються світлодіодні лампи які стали популярними і використовуються в більшості високотехнічних системах вирощування. Такі лампи мають багато плюсів в освітленні [18]:

- мають змогу управління спектральним виходом системи освітлення;
- випромінює не багато тепла і є можливість налаштування на інтенсивне освітлення;
- розрахований на тривале використання;
- вимкнення та увімкнення не потребую часу на розігрівання;
- економні витрати на довгий час;
- не містить ртуті;

Але не зважаючи на стільки плюсів використання світлодіодних ламп є самий великий мінус і це ціна.

Також при проектуванні системи освітлення, в зв'язку економії коштів, потрібно використовувати світлодіод тільки одного кольору. Найкращий варіант це синій світлодіод. Дослідження [19] показало, що використання тільки синіх світлодіодів для освітлення дає високу продуктивність і незначну різницю порівняно зі змішаним використанням синіх та червоних світлодіодів.

2.5.2 Контроль температури, вологості повітря та вентиляції

Такі функції, як контроль температури, вологості та вентиляції, зазвичай виконує одна або кілька систем. Ці параметри мікроклімата взаємопов'язані між собою.

На сьогоднішній день для охолодження теплиць використовуються такі технології: механічні системи охолодження з використанням вентиляторів,

теплових насосів і теплообмінних машин; природня вентиляція; охолодження випаровуванням; система підземних теплових насосів.

Найбільш популярний метод це охолодження випаровуванням. Але найкращий метод це праме охолодження повітря яке надходить до точки роси для контролю температури і вологості.

2.5.3 Збагачення CO₂

Для збагачення концентрації CO₂ всередині теплиці можна використувати джерела CO₂ які наведені в табл.4.2.3.1. [20]

Таблиця 2.1 – Джерела CO₂ які використовують в сільському господарстві

Рідкий CO ₂	CO ₂ у газоподібному стані стискають до рідкої форми та зберігають у спеціальних конструкціях. Газ пиваровують та за допомогою допоміжного обладнання та подають до теплиці. Через високу ціну техніки та контейнерів цей спосіб є витратним.
Генератор CO ₂	CO ₂ отримують в результаті згорання вуглеводневого палива. Такий метод можна використовувати в не великих теплицях, тому що несе в собі ризик того , що в процесі згорання при недостатній кількості кисню, можуть утворюватися додатково шкідливі домішки. Тому потрібно додатково ставити фільтри для отмання чистого CO ₂ . Цей метод не дільки дорогий але й важкий у використанні.
Розпад ферментації	CO ₂ утворюється в результаті орнагічного розкладання або ферментації. Це дешевший метод але має недоліки, важко контролювати концентрацію CO ₂ , займає багато місця і має неприємний запах.
Сухий лід	Сухий лід - CO ₂ в твердій формі. Це найдешевший спосіб в подачі CO ₂ в теплицю. Але сухий лід має дуже низьку

	температуру. Найбільшим недоліком є важкість зберігання в нормальних умовах і швидка сублімація сухого льоду, що може привезти до швидкого збільшення концентрації CO ₂ і може стати токсичним для рослин.
Хімічний метод	Хімічна реакція між харчовою содою (NaHCO ₃) і кислотою (зазвичай оцтова (CH ₃ COOH)) утворює CO ₂ . Але ми отримуємо малу концентрацію CO ₂ та багато витрат на харчову соду та кислоту.

2.6 Висновки до розділу

Розглянуто біологічні особливості суниці, її потенціал та проблеми вирощування в Україні, методи вирощування суниці з застосуванням високих технологій в управлінні параметрами мікроклімата та існуючі комп'ютеризовані методи вирощування суниці.

Розглянуто головні фактори проектування системи вирощування суниці (світло, вітер, обпилювачі, температура та вологість), підходи до вимірювання та контролю параметрів мікроклімата в теплиці вирощування суниці та головні методи утворення CO₂.

3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Одна з цілей при розробці комп'ютеризованої системи полягає в тому, що її можна використовувати в різних масштабах з багатьма окремими теплицями. Тому потрібний загальний комп'ютер-сервер для всієї системи, щоб відслідковувати і керувати роботою системи.

До загального серверу підключається контроллер-сервер для кожної теплиці. Ці клієнти відповідають за отримання керуючої інформації від сервера, отримання інформації про середовищі теплиці від датчиків, виконання обчислень та подачу керуючих сигналів на виконавчі пристрої. Ці клієнти також можуть відправляти інформацію про середовище теплиці на сервер для зберігання та подачі попереджувальних сигналів в міру необхідності.

До клієнтів в кожній теплиці підключені пристрої нижнього рівня. Нижній рівень включає в себе лампи, датчики температури та вологості, датчики кольору та концентрації CO₂. Пристрої цього рівня взаємодіють з об'єктом керування, яким є середовище теплиці.

Таким чином, при розробці структурної схеми система поділена на 3 рівня:

- Верхній рівень: комп'ютер-сервер;
- Середній рівень: контроллери-клієнти для кожної теплиці;
- Нижній рівень: виконавчі пристрої та датчики;

Загальна структурна схема комп'ютеризованої системи представлена на рис.3.1. На рис.3.1. використовуються наступні позначення:

T – температура;

RH – відносна вологість повітря;

PPFD – щільність фотосинтетичних фотонів;

ШИМ – широко-імпульсна модуляція;

RGB, RGBC – значення каналів кольорів: R– червоний, G–зелений, B– синій, C– прозорий;

CO₂ – концентрація CO₂;

Рядкові індекси:

бж – бажанні значення параметрів;

т – значення параметрів всередині теплиці;

б – значення параметрів в баці, в якому зберігається CO₂ ;

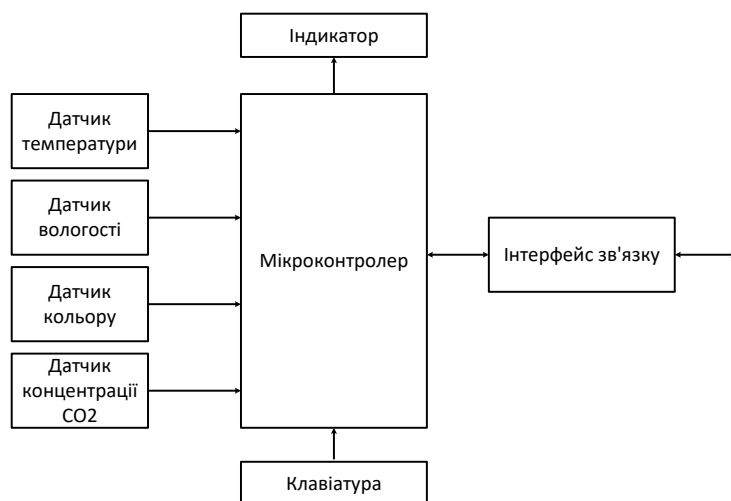


Рис. 3.1 - Структурна схема блоку обробки інформації комп'ютеризованої системи [53]

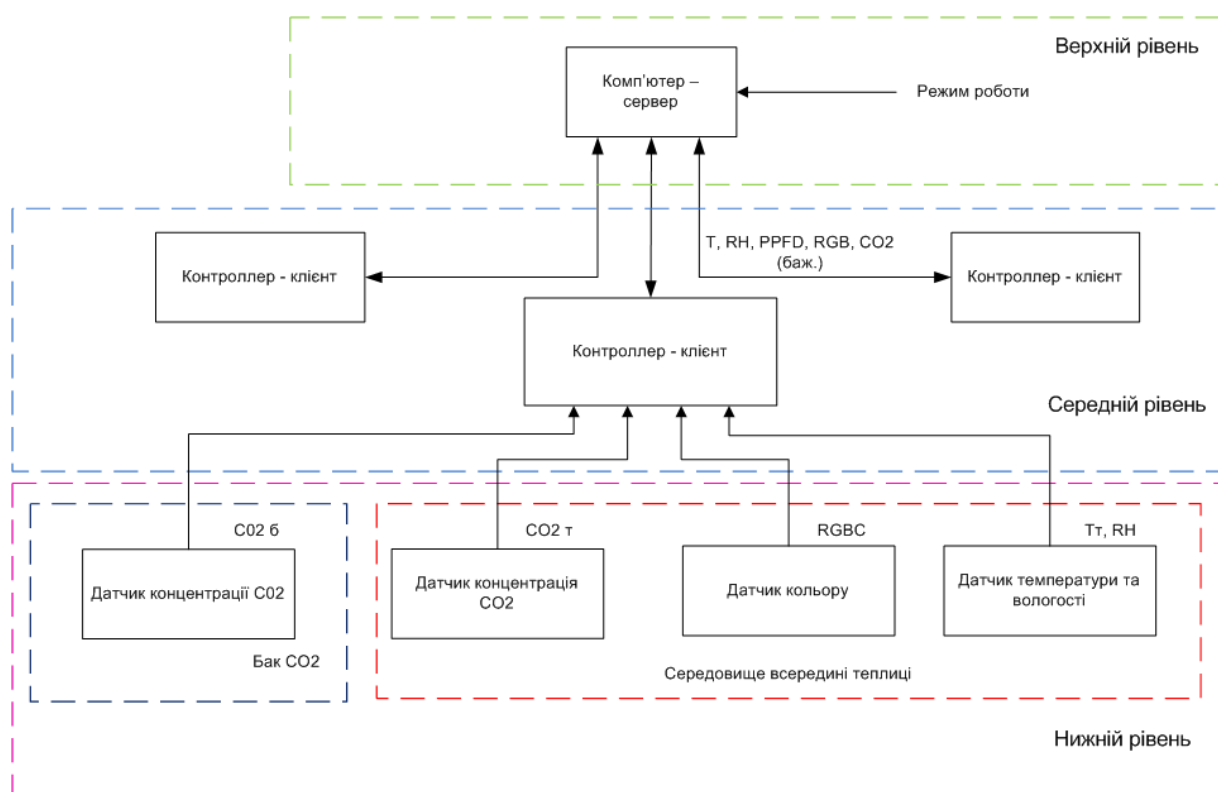


Рис.3.1 – Структурна схема системи вирощування суниці для нарощення

4. РОЗРОБКА ПРИНИПОВОЇ СХЕМИ

4.1. Вибір засобу реалізації системи

Компоненти системи вибираються які відповідають розрахункам, які виконані в минулому розділі.

Сервер

На основі розробленого алгоритму і структурної схеми сервер повинен мати можливість підключатись до великої кількості клієнтів. Також сервер повинен підключатися до монітора, щоб відслідковувати інформацію, а також для відображення інтерфейса для установки користувачем параметрів системи та режимів роботи. Також потрібне підключення до Інтернету для збереження отриманої інформації з навколинього середовища теплиці.

Однак для такої простої системи управління, в яку не інтегровані важкі рішення обробки даних, потреба сервера у обчислювальній потужності не надто висока. Крім того, оскільки ця система буде використовуватися в сільському господарстві на фермі, найкращим рішенням буде використовувати компакту, ізольовану платформу таку як одноплатний комп'ютер.

Найбільш популярною і доступною є Raspberry Pi 4 Model [41] і Asus Tinker Board [42]. Порівняння наведено в таблиці 4.1:

Табл.4.1.

	Raspberry Pi 4 Model	Asus Tinker Board
Модель ядер процесора	Cortex-A72	Cortex-A17
Кількість ядер	4	4
Частота процесора, ГГц	1.5	1.8
Оперативна пам'ять, ГБ	2/ 4/ 8	2
Тип пам'яті	LPDDR4	LPDDR3

Wifi	+	+
Bluetooth	+	+
Ethernet, Гбит/с	1	1
USB 2.0	2	4
USB 3.0	2	0
GPIO	40	40
UART	+	+
12C	+	+
Підтримка екрану	2 micro-HDMI	1 HDMI
Максимальний дозвіл, піксель	4096 x 2160	4096 x 2160
Напруги живлення, В	5	5
Струм споживання, А	3	2,5
Підтримка операційної системи	Linux, Raspbian	Linux, Android
Ціна, грн	2148 3552 4845	3500

Із порівняння видно, що два комп'ютера мають схожі можливості підключення і підходять для використання в системі. Їхня продуктивність майже однакова. Тому в системі використовується Asus Tinker Board R2.0 тому що він більш дешевий.

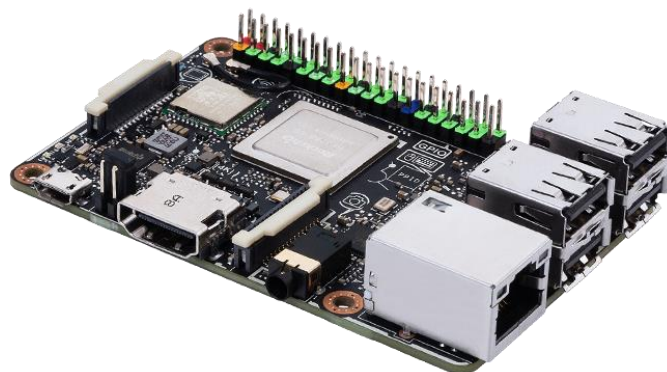


Рис.4.1 - Asus Tinker Board R2.0.

Клієнт

На відміну від серверу, клієнт підключається і працює з датчиками і виконуваними пристроями і не потребує взаємодії з оператором. Платформа Arduino Mega 2560 буде найкращим вибором, вона має велику кількість вивідних пінів, що перевищує інші, що робить її придатною для використання в якості клієнта.

Основні характеристики Arduino Mega 2560 [43]:

- мікроконтролер: ATmega2560;
- робоча напруга: 5 В;
- рекомендована вхідна напруга: 7-12 В;
- гранична вхідна напруга: 6-20 В;
- цифрові пінів введення/виводу: 54 (включаючи 15 ШІМ);
- постійний струм по піну: 20 мА;
- робоча частота: 16 МГц;
- ціна: 400 грн.;

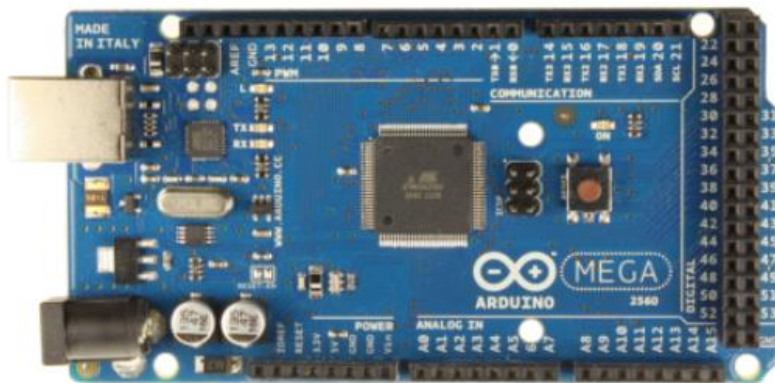


Рис.4.2 - Arduino Mega 2560

Для взаємодії між клієнтом і сервером можна використовувати USB, 12С, UART і т.д. Але при масштабному використанні комп'ютеризованої системи вирощування суниці відстань між сервером та локальними робочими клієнтами в теплицях дуже велика, може доходити до сотень метрів. Вищезазначені інтерфейси зв'язку не підходять для такої великої відстані, тому потрібно використовувати інший інтерфейс. Для підключення

віддалених контролерів зазвичай використовуються RS-422 [44] та RS-485 [45].

Табл.4.2 - Основні переваги RS-485 над RS-422

	RS-422	RS-485
Топологія мережі	Точка-точка, MultiDrop	Точка-точка, MultiDrop
Дуплекс мережі	Дуплексний режим, напівдуплексний зв'язок	Дуплексний режим, напівдуплексний зв'язок
Кількість пристроїв	1 драйвер 10 приймачів	32 приймопередавачі
Максимальна відстань	1200м при швидкості 100Кбіт/с	1200м при швидкості 100Кбіт/с
Напруга	-6В до +6В	-7В до 12В

При порівнянні видно що RS-485 має більші переваги по кількості підключених пристроїв.

Так як на Asus Tinker Board R2.0 і Arduino Mega 2560 немає порта підключення протокола RS-485, потрібно використовувати модуль перетворювача. Конвертуючий модуль RS485-TTL на MAX485 здатний перетворювати сигнал TTL шини UART на RS485.

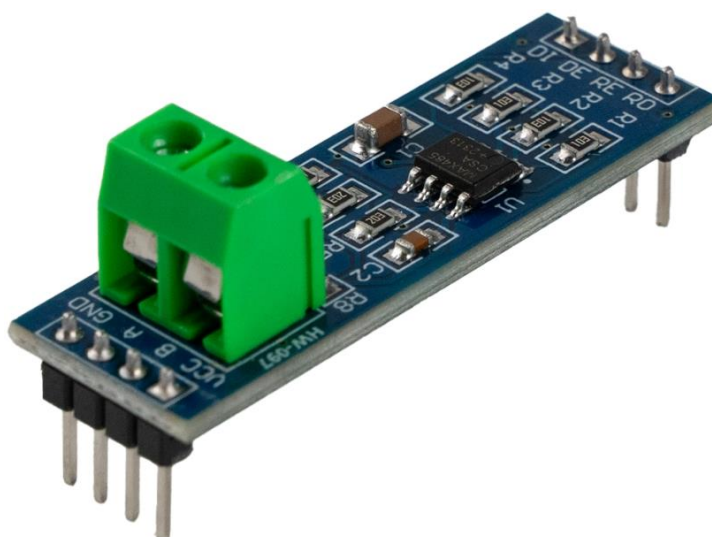


Рис.4.3 – Конвертуючий модуль RS485- TTL на MAX485

Характеристики модуля RS485- TTL на MAX485 [45]:

- робоча напруга: 5 В;
- максимальна частота передачі даних: 2,5 Мбіт/с;
- робоча температура: 0 °С до 70 °С;
- ціна: 40 грн.;

З'єднання між датчиками і клієнтом

Датчики можуть знаходитись далеко від контроллера-клієнта якщо теплиця великих розмірів. Тому на лініях з'єднання датчиків прийдеться використовувати модулі розширення щоб досягти потрібної відстані передачі даних. Для простоти в реалізації системи датчики повинні використовувати однаковий інтерфейс підключення.

I2C – це інтерфейс, який використовується великою кількістю різних датчиків. Крім того, цей інтерфейс також підтримує підключення багатьох різних пристроїв до однієї і тієї ж пари сигнальних ліній і може бути легко розширено за допомогою модуля. Тому для датчиків використання інтерфейса I2C основний критерій для використання в системі.



Рис.4.4 – Зображення модуля I2C Long Cable Extender на базі мікросхеми P82B715

Характеристики модуля I2C Long Cable Extender P82B715 [46]:

- MultiDrop роздача сигналів I2C;
- подвійний, двонаправлений, буфер з одиничним підсиленням за напругою без необхідності зовнішнього керування напрямком;

- діапазон напруги живлення: 3-12 В;
- тактова частота не менше 100 кГц і 400 кГц, якщо дозволяють інші системні затримки;
- ціна: 857 грн.

Датчик кольору

Датчик кольору повинен мати можливість вимірювати 4 кольорових канали RGBC, які будуть використовуватися для розрахунку яскравості і PPFD.

Табл.4.3 – Популярні доступні датчики кольору

	TCS3200	TCS34725
Робоча напруга, В	2,7-5,5	2,7-5,5
Інтерфейс	Частотний 4-піновий	I2C
Вимірювальні кольорові канали	RGBC	RGBC
ІЧ-фільтр	-	+
Ціна, грн	90	121

З таблиці бачимо що найбільше підходить датчик TCS34725 відповідає вимогам по інтерфейсу підключення для використання в системі.

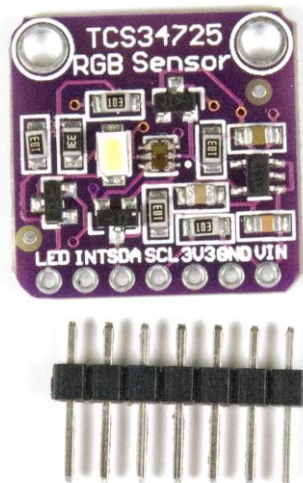


Рис.4.5 – Датчик TCS34725

Датчик температури та вологості повітря

Існує дуже багато датчиків температури та вологості повітря, таких як АМТ1001, Si7021, DHT22, HTU21, АНТ20, HDC1080 [47, 48, 49, 50, 51, 52]. Порівняння наведені в табл.4.6.

Табл.4.4 – Датчики температури та вологості повітря

	АМТ1001	Si7021	DHT22	HTU21	АНТ20	HDC1080
Робоча напруга , В	4,75-5,25	1,9-3,6	3-5	1,5-3,6	2-2,5	2,7-5,5
Інтерфейс	1 wire	I2C	1 wire	I2C	I2C	I2C
Діапазон вимірювань вологості, %	20-95	0-80	0-100	0-100	0-100	0-100
Похибки вимірювання вологості, %	5	3	2,5	2	5	4
Діапазон вимірювання температури, °C	0 до 60	-10 до 85	-10 до 85	5 до 60	20 до 60	5 до 60
Похибки вимірювання температури, °C	0,5	0,4	0,5	0,3	0,3	0,2
Ціна, грн	291	218	102	88	139	154

Найбільше підходить датчик HDC1080, він відповідає вимогам до робочої напруги і протоколу підключення і має найкращі характеристики для використання в системі.



Рис.4.6– Датчик HDC1080

Датчик концентрації CO₂

CO₂ всередині теплиці не постійно збагачується, а збагачується час від часу, що відповідає часу фотосинтезу рослин. Тож датчик концентрації CO₂ повинен мати достатню реакцію відгуку і короткий час нагріву, щоб його можна було б використовувати в системі.

Табл.4.5 – Датчики концентрації CO₂

	ENS160	CCS811	SEN0220	MN-Z19
Робоча напруга, В	3,3-5,5	1,8-3,6	4,5-5,5	3,6-5,5
Інтерфейс	I2C	I2C	UART	UART
Час нагріву	<3min	<10min	<3min	<3min
Діапазон вимірювання концентрації CO ₂ , млн ⁻¹	400-65000	400-8192	0-50000	0-5000
Похибка вимірювань, млн ⁻¹	50	50	50	50
Ціна, грн	2248	847	7263	2179

Найбільше всього підходить ENS160, має хорошу продуктивність та відповідає протоколу підключення.

4.2. Альтернативи при розробці

В таблиці 8.3. представленні можливі рішення для складання комплексу датчиків.

Табл.4.6 – Морфологічна матриця

	1	2	3
А. Одноплатний комп'ютер для серверу	Asus Tinker Board R2.0	Raspberry Pi 4 Module B	
Б. Плата для клієнта	Arduino Mega 2560	Arduino Uno	
В. Датчик кольору	TCS34725		
Г. Датчик температури і вологості	HDC1080	АHT20	HTU2I
Г.. Датчик CO ₂	ENS160	CCS811	

Основний варіант рішення це А1Б1Г1Г1. Цей варіант найбільше підходить по технічним вимогам для розробки проекту.

Альтернативний варіант рішення включають А1Б2Г1Г2 та А2Б2Г1Г2.

4.3. Розробка функціональної схеми та принципової схеми

Згідно елементам системи, які були обрані в розділі 4.1. можна розробити функціональну схему на основі розробленої структурної схеми. В якості комп'ютера сервера використовується одноплатний комп'ютер Asus Tinker Board R2.0, до якого по інтерфейсу RS-485 підключені контролери-клієнти Arduino Mega 2560. Лінії зв'язку по інтерфейсу RS-485 отримали за допомогою інвертуючого перетворювального модуля RS485-TTL на MAX485. Всі датчики підключаються до контролера по інтерфейсу I2C з модулями розширення I2C Long Cable Extender P82B715. Тож з описаного вище була отримана функціональна схема, рис 4.7. . Принципова схема наведена в додатку В

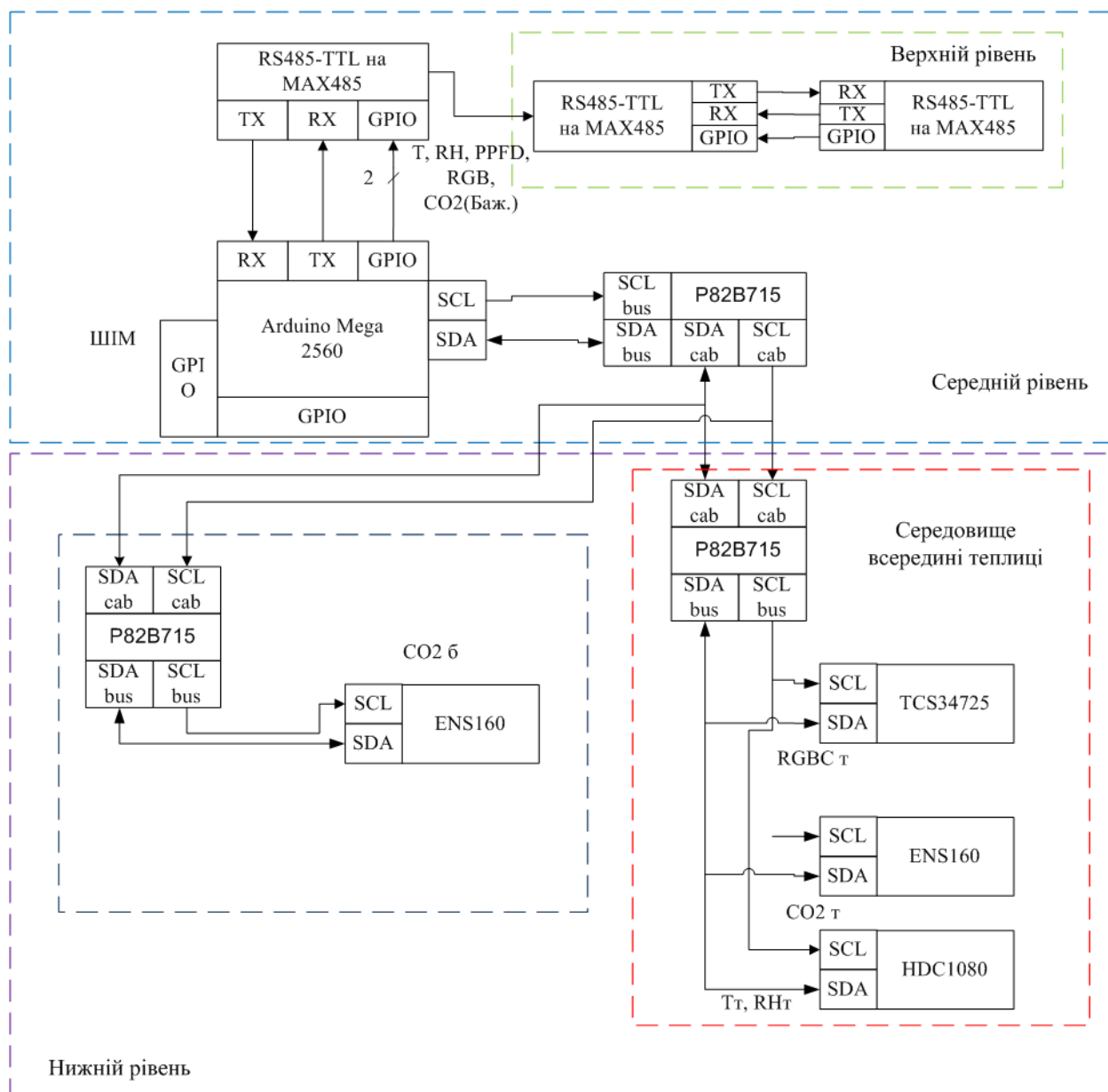


Рис.4.7 – Функціональна схема системи

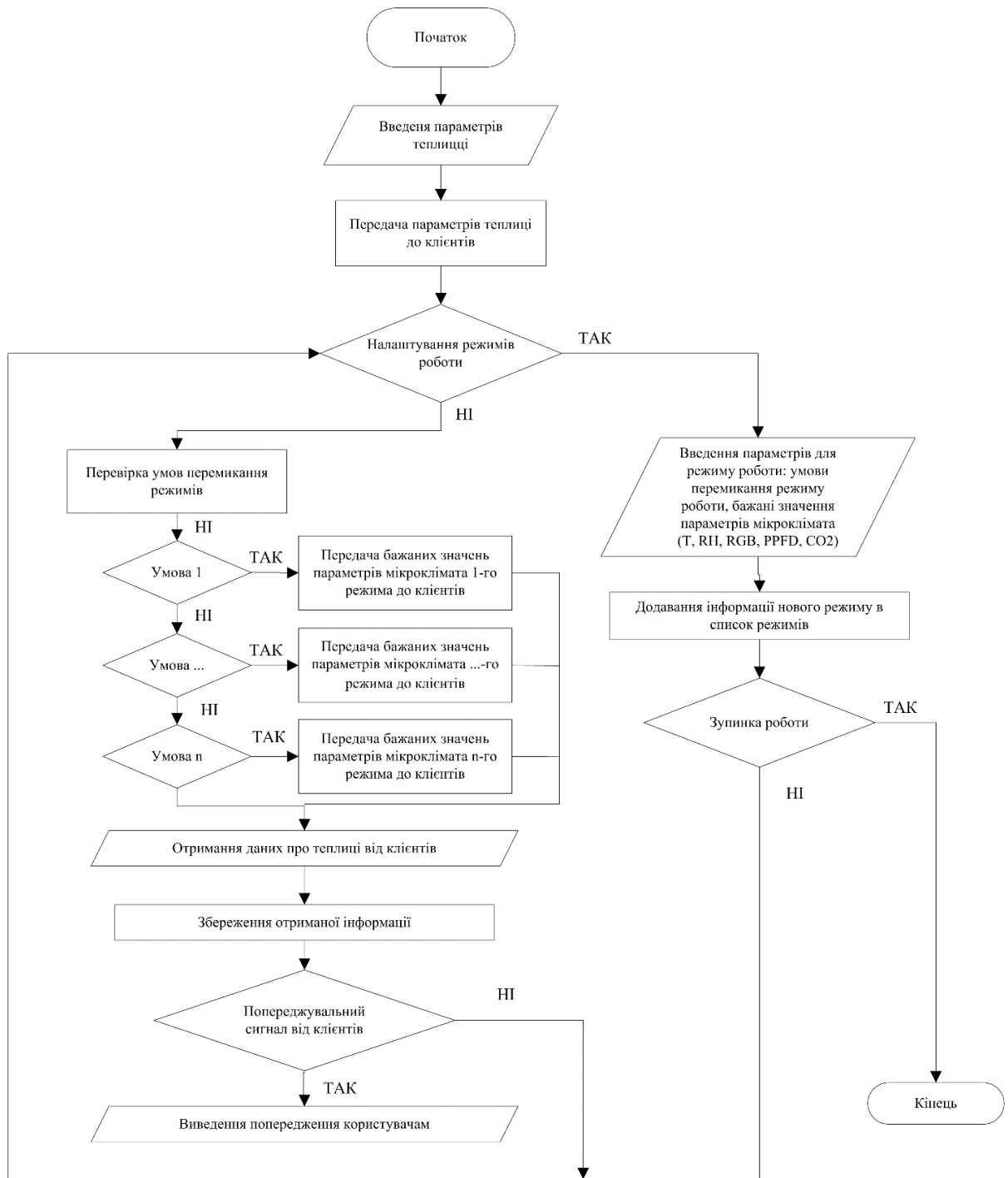
5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Згідно структурній схемі сервер повинен виконувати наступні функції:

- робота з операторами по налаштуванню параметрів і режимів роботи;
- відправка інформації про режим роботи підключеним клієнтам;
- збереження отриманих даних для майбутнього використання.

Клієнт повинен виконувати наступні функції:

- отримання інформації про режим роботи від сервера;
- отримання інформації про стан теплиці від датчиків;
- виконання розрахунків і подача керуючих сигналів на виконавчі пристрої;
- відправка даних про теплицю та попереджувальні сигнали серверу.





6. РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

6.1. Розрахунки параметрів комп'ютеризованої системи

Комп'ютеризована система вирощування суниці в теплиці призначена для використання в різних масштабах. Тому розрахунки проводяться для базового тепличного блоку стандартних розмірів. Отримані результати можна використовувати для різних масштабів вирощування суниці за допомогою розрахунків.

Вихідні дані:

Теплиця оточує 2 рядки суниці на гідропонових водопровідних трубах. Площа листової дуги рослини суниці приблизно 30 см в діаметрі. Висота куста суниці близько 25 см. Щоб розмір теплиці був не великим, а конструкція ферми простою та в той же час надійною, теплиця має форму циліндра. Тобто поперечний розріз конструкції (якщо дивитися збоку, впоперек рядів суниці) – круглий.

Розмір теплиці:

- діаметр циліндра/ширина площини підлоги: $d = 0,8 \text{ м}$;
- довжина теплиці: $l = 1 \text{ м}$;
- площа поля: $A_f = d * l = 0,8 \text{ м}^2$;
- загальна площа теплиці: $A_c = \pi * d * l + 2 * \pi * d^2/4 \approx 3,5 \text{ м}^2$;
- об'єм теплиці: $V = \pi * d^2/4 * l \approx 0,5 \text{ м}^3$;
- матеріал покриття: ПНГ (поліетилен низької щільності);
- товщина матеріалу: $x = 150 \text{ мкм} = 1,5 * 10^{-4} \text{ м}$;

Погодні умови зовні теплиці

- температура повітря: $T_{\text{зовн}} = 35 \text{ }^\circ\text{C} = 308 \text{ К}$;
- відносна вологість повітря: $RH_{\text{зовн}} = 50 \text{ \%}$;
- звичайна концентрація CO_2 : $n_{\text{звич}} = 400 \text{ ppm}$;
- щільність енергії сонячного випромінювання: $I = 1000 \text{ Вт/м}^2$;

Бажані погодні умови всередині теплиці

- температура повітря: $T_{\text{всер}} = 23 \text{ }^\circ\text{C} = 296 \text{ К}$;

- відносна вологість повітря: $RH_{\text{зовн}} = 70 \%$;
- збагачена концентрація CO_2 : $n_{\text{збаг}} = 800 \text{ ppm}$;
- щільність потоку фотосинтетичних фотонів: $500 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 * \text{с})$;

6.2. Система додаткового освітлення

Щоб оптимізувати інтенсивність фотосинтеза рослин, додаткове освітлення можна починати в 5 годин ранку. В цей час природнього світла не достатньо, тому потрібно забезпечити всі потрібні PPFD (фотосинтетично активне потокове випромінювання).

Для синього світлодіода з довжиною хвилі 450 нм потрібно 4500 люкс для досягнення рівня PPFD $500 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 * \text{с})$ [25].

Потрібно використовувати для кожного ряду суниці ряд світлодіодних світильників, які будуть висіти на відстані 35 см від основи рослини, тобто приблизно в 10 см від листочків. Точка максимальної відстані від світлодіода до листя $r_{\text{max}} = 18 \text{ см}$. Припустимо світлодіод має такий кут проекції 2π стеррадіан.

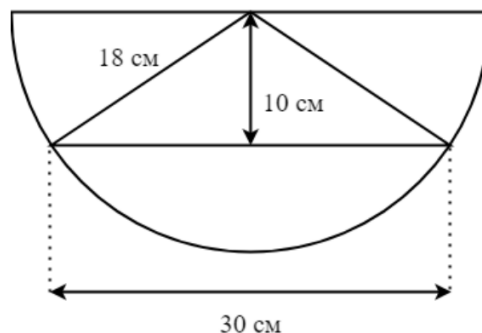


Рис.6.1 – Кут освітлення світильника

Урівень PPFD $500 \text{ мкмоль}/(\text{м}^2 * \text{с})$ повинен бути навіть в самому далекому листі від джерела світла. Площа освітлюваної померхності, м^2 :

$$S_{\text{осв}} = 2\pi r_{\text{max}}^2 + \pi r_{\text{max}} l = 2\pi * 0,18^2 + \pi * 0,18 * 1 \approx 0,77$$

Потрібна якість використовуваного джерела світла, лм:

$$L_{\text{вик}} = 4500 * S_{\text{осв}} = 4500 * 0,77 \approx 3465$$

Для світлодіодів світлова віддача зазвичай складає: $\eta_{\text{LED}} = 90 \text{ лм/Вт}$

Потрібна потужність системи додаткового освітлення для теплиці включаючи 2 ряди суниці, Вт:

$$P_{\text{осв}} = \frac{L_{\text{вик}}}{\eta_{\text{LED}}} * 2 = \frac{3465}{90} * 2 \approx 77$$

6.3. Система контролю температури і вологості повітря

Початкові розрахунки потужності

Модель стаціонарного енергетичного балансу теплиці:

$$Q'_{\text{SR}} + Q'_C + Q'_{\text{TR}} - Q'_{\text{ET}} - Q'_V = 0,$$

де Q'_{SR} - кількість теплоти, отримана від сонячного випромінювання за секунду, Вт;

Q'_C - кількість теплоти, отримана від теплопередачі за секунду, Вт;

Q'_{TR} - кількість теплоти, отримана від теплового випромінювання за секунду, Вт;

Q'_{ET} - кількість теплоти, яку витрачає рослина на випаровування води за секунду, Вт;

Q'_V - кількість теплоти, відведеною вентиляцією системи вимірювання температури і вологості повітря, Вт.

В подальших розрахунках кількості тепла, отриманого від випромінювання, інфрачервоне випромінювання (ІЧ) Сонця та теплове випромінювання не враховуються. Тому що поліетилен низького тиску з якого зроблене покриття – майже прозорий для ІЧ. Крім того листя рослин майже не поглинає ближнє ІЧ, бо вода в їхньому складі слабо взаємодіє з цим діапазоном. Тому більшість такого випромінювання або відбивається, або проходить через них.

Сонячне випромінювання при досягненні землі складається з 42 % видимого світла, 50 % ІЧ і 8 % ультрафіолетового випромінювання [26]. Коефіцієнт поглинання поліетиленом ультрафіолетом сонячного випромінювання приблизно 100 см^{-1} [27]. Коефіцієнт поглинання бачимого світла $1/5$ коефіцієнту поглинання ультрафіолетового випромінювання [28], 20 см^{-1} . Поглинання листям падаючого світла, включаючи тільки ультрафіолетовий та видиме світло, близько 90 %. Для випромінювання ближнього інфрачервоного

діапазону близько 10 % поглинається листям [29], 50 % відображається та 40 % пропускається [30, 31].

$$Q'_{SR} = R_{дах} + R_{рос} = 137 + 277 = 414$$

де $R_{дах}$ – кількість теплоти, яку дах отримує від сонячного випромінювання за секунду, Вт;

$R_{рос}$ – кількість теплоти, яку рослини отримують від сонячного випромінювання за секунду, Вт;

$$R_{дах} = A_f * l * (\beta_{UV} + \beta_{VIS}) * a_{PE} = 0,18 * 100 * (0,08 + 0,42) * 0,342 \approx 137$$

де a_{PE} – поглинання покриттям випромінювання ультрафіолетового світла.

$$\begin{aligned} a_{PE} &= \frac{\beta_{UV}}{\beta_{UV} + \beta_{VIS}} * (1 - e^{-\alpha_{UV}*x}) + \frac{\beta_{VIS}}{\beta_{UV} + \beta_{VIS}} * (1 - e^{-\alpha_{VIS}*x}) \\ &= \frac{8\%}{8\% + 42\%} * (1 - e^{-10000*1,5*10^{-4}}) + \frac{42\%}{8\% + 42\%} \\ &\quad * (1 - e^{-20000*1,5*10^{-4}}) \approx 0,342 \end{aligned}$$

де β_{UV} – ультрафіолетова складова в сонячному випромінюванні. $\beta_{UV} = 8\%$;

α_{UV} – коефіцієнт поглинання ПНТ ультрафіолетової складової сонячного випромінювання. $\alpha_{UV} = 100 \text{ см}^{-1} = 10000 \text{ м}^{-1}$;

β_{VIS} – складова видимого світла в сонячному випромінюванні. $\beta_{VIS} = 42\%$;

α_{VIS} – коефіцієнт поглинання ПНТ для видимого світла. $\alpha_{VIS} = 20 \text{ см}^{-1} = 2000 \text{ м}^{-1}$.

$$R_{рос} = (A_f * l * ((\beta_{UV} + \beta_{VIS})) - R_{дах}) * a_{ps} + A_f * l * \beta_{IR} * a_{ws} = (0,8 * 1000 * (0,08 + 0,42) - 137) * 0,9 + 0,8 * 1000 * 0,5 * 0,1 \approx 277 = 0,9;$$

де a_{ps} – поглинання листочками ультрафіолетового і видимого світла. $a_{ps} = 0,9$;

β_{IR} – інфрачервона складова в сонячному випромінюванні. $\beta_{IR} = 0,5$;

a_{ws} – поглинання листочками, випромінювання інфрачервоного діапазону. $a_{ws} = 10\% = 0,1$.

$$Q'_C = A_c * U * (T_{зовн} - T_{всеп}) = 3,5 * 9,955 * (308 - 296) \approx 420$$

U – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²*К).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{x}{\lambda_{\text{ПЕ}}} + \frac{1}{h_i}} = \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1,5 * 10^{-4}}{0,33} + \frac{1}{20}} \approx 9,995$$

де h_0, h_i – коефіцієнт конвекції повітря поза та всередині теплиці, Вт/(м²*К). $h_0 = h_i = 20$ [32].

$\lambda_{\text{ПЕ}}$ – коефіцієнт теплопровідності поліетелену, Вт/(м²*К). $\lambda_{\text{ПЕ}} = 0,33$ [32].

Для розрахунків кількості теплоти, отриманої від теплового випромінювання, припустимо, що нижня половина теплиці отримує випромінювання від землі, а верхня – від неба. Температура землі в сонячну погоду на 10°C вище температури повітря, а температуру неба можна розрахувати за формулою [33]:

$$T_{\text{небо}} = \sqrt[4]{\epsilon_{\text{небо}}} * T_{\text{зовн}} = \sqrt[4]{0,85} * 308 \approx 296$$

де $\epsilon_{\text{небо}}$ – випромінювальна можливість неба, $\epsilon_{\text{небо}} \approx 0,85$.

$$\begin{aligned} Q'_{\text{TR}} &= \left(A_f * \epsilon_{\text{лист}} + \frac{A_c}{2} * \epsilon_{\text{ПЕ}} \right) * \sigma * (T_{\text{земля}}^4 + T_{\text{небо}}^4 - 2 * T_{\text{всер}}^4) \\ &= \left(0,8 * 0,95 + \frac{3,5}{2} * 0,1 \right) * 5,67 * 10^{-8} * (318^4 + 296^4 - 2 * 296^4) \approx 135 \end{aligned}$$

де $\epsilon_{\text{лист}}, \epsilon_{\text{ПЕ}}$ – випромінювальна здатність листя і поліетилену, $\epsilon_{\text{лист}} \approx 0,95$. [34]; $\epsilon_{\text{ПЕ}} = 0,1$ [35];

σ – постійна Стефана-Больцмана, Вт/(м² * К⁴). $\sigma = 5,67 * 10^{-8}$;

$T_{\text{земля}}$ – температура поверхності землі, К. $T_{\text{земля}} = T_{\text{зовн}} + 10 = 318$.

$$Q'_{\text{ЕТ}} = A_f * ET * \lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 0,8 * 3,52 * 10^{-5} * 2450 * 10^3 \approx 69$$

де ET – швидкість сумарного випаровування, кг/(м² * с). Для суниці $ET = 3,52 * 10^{-5}$ [36];

$\lambda_{\text{H}_2\text{O}}$ – прихована теплота пароутворення/конденсації води, Дж/кг. $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 2450 * 10^3$ [32];

Із цих всіх розраховувать отримуємо:

$$Q'_V = Q'_{SR} + Q'_C + Q'_{ET} - Q'_{TR} = 414 + 420 + 135 - 69 = 900$$

Q'_V – це теплота яку необхідно усунути для підтримки температури всередині теплиці в бажаном значенні $T_{всер} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ за допомогою вентиляції. Для того щоб підтримувати відносну вологість повітря на рівні $RH_{всер} = 70\%$ потрібно видаляти водяний пар з повітря, який поступає в теплицю при вентиляції. Водяний пар видаляють конденсацією, знижуючи температуру повітря, який поступає в теплицю, до відповідної точки роси.

Точка роси, яка відповідає стану повітря всередині теплиці:

$$T_{TR} \approx T_{всер} - \frac{100\% - RH_{всер}}{5\%} = 296 - \frac{100 - 70}{5} = 290$$

Потужність охолодження вентиляції можна переписати у вигляді:

$$Q'_V = \frac{\psi}{3600} * V * p * c_p * (T_{всер} - T_{TR})$$

де ψ – швидкість оновлення повітря, час;

p – щільність повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$. $p = 1,192$ [32];

c_p – питома ізобрана теплоємність повітря, $\text{Дж}/(\text{кг} * \text{K})$. $c_p = 1000$ [32].

$$\psi = \frac{Q'_V * 3600}{V * p * c_p * (T_{всер} - T_{TR})} = \frac{900 * 3600}{0,5 * 1,192 * 1000 * (296 - 290)} \approx 906$$

Потік повітря, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$F = \psi * V = 960 * 0,5 = 453 \frac{\text{м}^3}{\text{год}} \approx 0,126$$

Потрібна енергія за секунду для видалення водяного пару від повітря яке поступає, Вт:

$$Q'_{осуш} = F * \lambda_{H_2O} * (AH_{зовн} - AH_{всер}) = 0,126 * 2450 * 10^3 * (19,8 - 14,4) * 10^{-3} \approx 1667$$

де $AH_{зовн}, AH_{всер}$ – абсолютна вологість повітря поза та всередині теплиці, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Абсолютна вологість повітря при температурі T визначається по формулі [37]:

$$AH(T) = \frac{RH * P_5(T)}{461,5 * T}$$

де $P_5(T)$ – тиск насиченого пару води при температурі T , Па.

$P_5(T)$ можна порахувати за допомогою рівняння Тетенса [38]:

$$P_5(T) = 0,61078 * e^{\frac{17,27 * T}{T + 237,3}} * 1000$$

Використав вище дві функції для температур $T_{\text{всер}}$ і $T_{\text{тр}}$, отримали $AH_{\text{зовн}} = 19,8 * 10^{-3}$, $AH_{\text{всер}} = 14,4 * 10^{-3}$.

Необхідна енергія за секунду для охолодження повітря, що надходить до точки роси, Вт:

$$\begin{aligned} Q'_{\text{охолод}} &= F * p * c_p * (T_{\text{всер}} - T_{\text{тр}}) = \\ &= 0,126 * 1,192 * 1000 * (308 - 290) \approx 2703 \end{aligned}$$

Повна необхідна потужність для охолодження та осушення повітря, що надходить, Вт:

$$Q'_{\text{повн}} = Q'_{\text{осуш}} + Q'_{\text{охолод}} = 1667 + 2703 = 4370$$

Від отриманого результату повної необхідної потужності можна встановити, що витрати енергії для підтримки температури і вологості надто великі.

Подивившись на проаналізовані вище фактори, можна побачити, що кількість отриманої теплоти набагато більша, як від теплопередачі, так і від випромінювання, включаючи сонячне і теплове. Обмежуючи цю кількість теплоти, можна значно знизити потужність, яка потрібна для підтримки температури і вологості в теплиці.

Для того щоб обмежити цю кількість отриманої теплоти, потрібно ретельно утеплити навколишнє середовище всередині теплиці і зовні.

Розрахунки потужності системи при використанні ізоляції для теплиці

Для того щоб зробити теплицю простою в установці і водночас дешевою, один з самих оптимальних рішень це використання двох шарів покриття теплиці. Повітря має дуже низький коефіцієнт теплопровідності.

При використанні двох шарів поліетелену, розділений повітряним простором між ними, здатність теплопередачі між внутрішньою і зовнішньою частиною теплиці буде знижена.

Окрім теплоізоляції, необхідно блокувати потрапляння випромінювання зовні до теплиці. Самий простий і не дорогий метод – використовувати алюмінієву фольгу для покриття поверхні теплиці. Алюмінієва фольга має коефіцієнт відображення 95% для діапазону довжини хвиль 250-2500 нм, що еквівалентно спектру сонячного випромінювання.

Модель стаціонарного енергетичного балансу теплиці при застосуванні повної ізоляції:

$$Q'_{ocb} + Q'_{SR,i} + Q'_{C,i} - Q'_{ET,i} + Q'_{TR,i} - Q'_{V,i} = 0$$

де Q'_{ocb} – кількість теплоти від системи освітлення за секунду, Вт. $Q'_{ocb} = P_{ocb} * 0,65 \approx 50$ [39]

Кількість теплоти, отримана від сонячного випромінювання за секунду:

$$Q'_{SR,i} = (A_f * l - R_{зовн} - R_{всер}) * (1 - k_{відоб}) = (800 - 137 - 90) * (1 - 0,95) \approx 29$$

де $R_{зовн}$ – кількість теплоти, яку зовнішній шар покриття отримує від сонячного випромінювання за секунду, Вт.

$R_{всер}$ – кількість теплоти, яку внутрішній шар покриття отримує від сонячного випромінювання за секунду, Вт.

$k_{відоб}$ – коефіцієнт відбиття алюмінієвої фольги, ε . $k_{відоб} = 0,95$ [40]

$$R_{зовн} = A_f * l * (\beta_{UV} + \beta_{VIS}) * \alpha_{PE} = 0,8 * 1000 * (0,08 + 0,42) * 0,342 \approx 137$$

$$R_{всер} = (A_f * l * (\beta_{UV} + \beta_{VIS}) - R_{зовн}) * \alpha_{PE} = (0,8 * 1000 * (0,08 + 0,42) - 137) * 0,342 \approx 90$$

$$R_{рос,i} = (A_f * l - R_{зовн} - R_{всер}) * (\beta_{UV} + \beta_{VIS}) * \alpha = (0,8 * 1000 - 137 - 114) * (0,08 + 0,42) * 0,9 \approx 247$$

Припустимо, що всередині теплиці знаходиться середовище з однорідною температурою і що теплиця обмінюється тепловим

випромінюванням з навколишнім середовищем тільки через шар алюмінієвої фольги.

Кількість теплоти, відведеної через теплове випромінювання:

$$Q'_{TR.i} = \frac{A_c}{2} * \epsilon_{Al} * \sigma * (T_{земля}^4 + T_{небо}^4 - 2 * T_{всер}^4)$$

$$= \frac{3,5}{2} * 0,03 * 5,67 * 10^{-8} * (318^4 + 296^4 - 2 * 296^4) \approx 8$$

де ϵ_{Al} – випромінювальна здатність алюмінієвої фольги, $\epsilon_{Al} = 0,03$ [41].

Кількість теплоти, отримана від конвекції за секунду:

$$Q'_c = A_{c.i} * U_i * (T_{зовн} - T_{всер}) = 3,94 * 0,476 * (308 - 296) \approx 23$$

де U_i – коефіцієнт теплопередачі при ізоляції, Вт/(м³ * К);

$A_{c.i}$ – загальна площа покриття теплиці при ізоляції, м².

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{x}{\lambda_{ПЕ}} + \frac{x_i}{k_{повітря}} + \frac{x}{\lambda_{ПЕ}} + \frac{x_{Al}}{k_{Al}} + \frac{1}{h_i}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{20} + \frac{1,5 * 10^{-4}}{0,33} + \frac{0,01}{0,025} + \frac{1,5 * 10^{-4}}{0,33} + \frac{0,0002}{237} + \frac{1}{20}} \approx 0,476$$

де $k_{повітря}$ – коефіцієнт теплопровідності повітря, Вт/(м * К). $k_{повітря} = 0,025$ [38];

x_i – товщина шару повітря для ізоляції, м. Прийнят $x_i = 0,05$;

k_{Al} – коефіцієнт теплопровідності алюмінія, Вт/(м * К). $k_{Al} = 237$ [42];

x_{Al} – товщина алюмінієвої фольги, м. $x_{Al} = 0,0002$.

$$A_{c.i} = (l + x_i) * \pi * (d + x_i) + 2\pi * \frac{(d + x_i)^2}{4} = 1,01 * \pi * 0,81 + 2\pi * \frac{0,81^2}{4}$$

$$\approx 3,94$$

Кількість теплоти, яка витрачається на випаровування води з поверхності рослин та ґрунту:

$$Q'_{ET.i} = Q'_{ET} = 69$$

Отримуємо:

$$Q'_{V.i} = Q'_{осв} + Q'_{SR.i} + Q'_{TR.i} + Q'_{C.i} - Q'_{ET.i} = 50 + 29 + 8 + 23 - 69 = 41$$

Необхідний потік повітря, м³/с:

$$F_i = \frac{Q'_{V.i}}{p * c_p * (T_{всер} - T_{ТР})} = \frac{41}{1,192 * 1000 * (296 - 290)} \approx 5,7 * 10^{-3}$$

Необхідна енергія за секунду для видалення водяного пару з потоку вхідного повітря, Вт:

$$\begin{aligned} Q'_{осуш.i} &= F_i * \lambda_{H^2O} \lambda_{H^2O} * (AH_{зовн} - AH_{всер}) \\ &= 5,7 * 10^{-3} * 2450 * 10^3 * (19,8 - 14,4) * 10^{-3} \approx 122 \end{aligned}$$

Необхідна енергія за секунду для охолодження повітря до точки роси, Вт:

$$\begin{aligned} Q'_{охолод.i} &= F_i * p * c_p * (T_{всер} - T_{ТР}) \\ &= 5,7 * 10^{-3} * 1,192 * 1000 * (308 - 290) \approx 122 \end{aligned}$$

Повна необхідна потужність для охолодження, осушення і нагріву вхідного повітря, Вт:

$$Q'_{рег.i} = Q'_{осуш.i} + Q'_{охолод.i} = 75 + 122 = 197$$

Повне покриття теплиці алюмінієвою фольгою привело до того, що світлодіоди стали єдиним джерелом світла і повинні були працювати безперервно протягом дня. Тоді повна потрібна потужність, Вт:

$$Q'_{повн.i} = Q'_{рег.i} + P_{осв.} = 197 + 77 = 274$$

Повна потрібна потужність знижена в 15,9 разів у порівнянні з системою без ізоляції.

Порівняння повних необхідних потужностей системи контролю температури і вологості в двох випадках при інтервалі температури повітря поза теплицею від 25 °С до 35 °С і незмінної абсолютної вологості показано на рис.5.2.2.2.1:

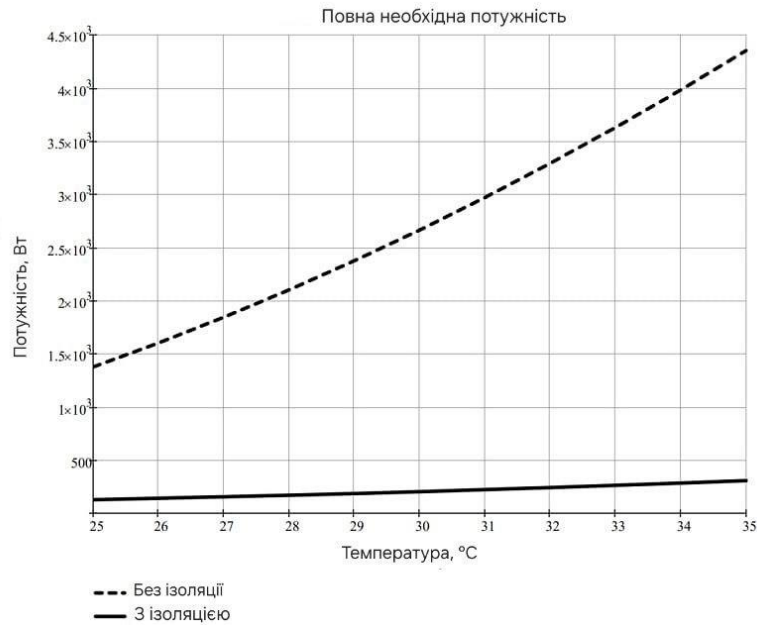


Рис.6.2 – Повна необхідна потужність при інтервалі температури повітря поза теплицею від 25 °C до 35 °C і незмінною абсолютною вологістю

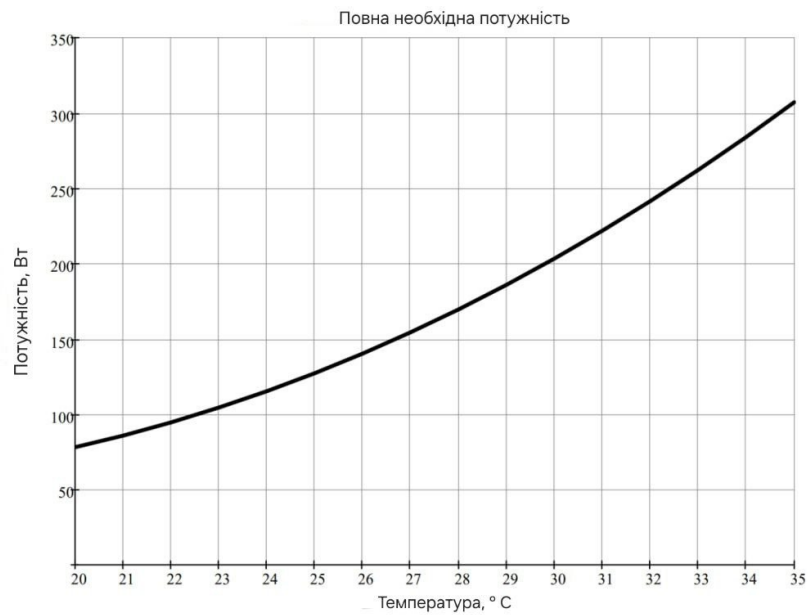


Рис.6.3 – Повна необхідна потужність з ізоляцією при інтервалі температури повітря поза теплицею від 25 °C до 35 °C і незмінною абсолютною вологістю

6.4. Система збагачення CO₂

Витрата ваги CO₂ потрібно забезпечити при збагаченні, кг/с:

$$\omega_{\text{CO}_2} = F_i * (n_{\text{збаг.}} - n_{\text{звич.}}) * p_{\text{CO}_2} = 5,7 * 10^{-3} * (800 - 400) * 10^{-6} * 1,796$$

$$\approx 4,09 * 10^{-6}$$

де p_{CO_2} – щільність вуглекислотного газу, кг/м^3 . $p_{\text{CO}_2} = 1,796$ [38].

Потік вуглекислотного газу, $\text{м}^3/\text{с}$:

$$F_{\text{CO}_2} = \frac{\omega_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}_2}} = \frac{4,09 * 10^{-6}}{1,796} \approx 2,28 * 10^{-6}$$

CO_2 можна подавати в теплицю крапельним методом, аналогічним краплинному зрошенню, за допомогою вентилятора для підвищення тиску і труб з маленькими вентиляційними отворами. Але вуглекислотний газ стискається, тому закон Бернулі не можна застосувати для розрахунку швидкості на виході.

6.5. Висновки до розділу

Розрахувала параметри комп'ютеризованої системи такі як система контролю температури та вологості повітря, додаткове освітлення, потужність системи при використанні ізоляції для теплиці. Отримавши результати розраховувань можна приступити до розробки комп'ютеризованої системи вирощування суниці.

7. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ

7.1. Моделювання процесу контролю температури і вологості

Створення математичних моделей

Математична модель процесу вимірювання температури всередині теплиці була створена на основі моделі стаціонарного енергетичного балансу в розділі 5.2.2. При невеликому інтервалі часу dt , коли температура всередині теплиці дорівнює $T_{\text{теп}}$:

$$V * p * c_p * \frac{dT_{\text{теп}}}{dt} = Q'_{\text{осв}} + Q'_{\text{SR},i} + Q'_{\text{C},i} - Q'_{\text{ET},i} + Q'_{\text{TR},i} - Q'_{\text{V},i}$$

Щоб спростити модель будемо рахувати кількість теплоти, отриманої від системи освітлення, сонячного випромінювання та постійною евапотранспірацією і рівною $Q'_k = Q'_{\text{осв}} + Q'_{\text{SR}} - Q'_{\text{ET}}$. Тоді

$$V * p * c_p * \frac{dT_{\text{теп}}}{dt} = Q'_k + \frac{A_c}{2} * \epsilon_{\text{Al}} * \sigma * (T_{\text{земля}}^4 + T_{\text{небо}}^4 - 2 * T_{\text{всер}}^4) \\ + F_i * p * c_p * (T_{\text{повітря}} - T_{\text{теп}}) + A_{\text{с},i} * U_i * (T_{\text{поз}} - T_{\text{теп}})$$

Згідно математичної моделі зміни температури внутрішнього середовища теплиці воно залежить від температури навколишнього середовища $T_{\text{поз}}$, температура повітря що надходить $T_{\text{повітря}}$ і потік повітря що надходить F_i . Постійна часу моделі не фіксована і залежить від F_i .

Зміни вологості повітря визначається по абсолютній вологості повітря яке надходить та виходить. При невеликому інтервалі часу dt , коли абсолютна вологість повітря внутрішнього середовища теплиці має значення $AN_{\text{теп}}$, її зміни описуються так:

$$dAN_{\text{теп}} = (AN_{\text{вхйд}} - AN_{\text{теп}}) * F_i * dt \Rightarrow \frac{dAN_{\text{теп}}}{dt} = (AN_{\text{вхйд}} - AN_{\text{теп}}) * F_i$$

Відносна вологість визначається відношенням абсолютної вологості та абсолютної вологості насиченого водяної пару $AN_{\text{нас}}$ при температурі T .

$$AN_{\text{нас}} = \frac{0,61078 * \exp\left(\frac{17,27 * (T - 273)}{(T - 273) + 237,3}\right) * 1000}{461,5 * T}$$

Зворотні зв'язки температури і вологості внутрішнього середовища теплиці вимірюються датчиком HDC1080, який має постійну часу 15 с. Передаточна функція датчика має вигляд: $\frac{1}{(15*s+1)}$.

Повітря яке надходить охолоджується за допомогою елементів Пельтьє і блоків радіатора. Процес охолодження повітря всередині тунелю описується математичною моделлю, так як і модель процесу вимірювання температури внутрішнього середовища теплиці.

$$V_{\text{тун}} * p * c_p * \frac{dT}{dt} = h * A_{\text{рад}} * (T_{\text{ТЕЕ}} - T) + A_{\text{с.тун}} * U * (T_{\text{поз}} - T) + F_i * p * c_p * (T_{\text{поз}} - T) + F_i * \lambda_{H_2O} * (AH_{\text{поз}} - AH_{\text{тун}})$$

де $V_{\text{тун}}$ – об'єм тунеля охолодження;

$A_{\text{рад}}$ – загальна площа радіатора;

h – коефіцієнт конвективної теплопередачі між повітрям і радіатором в тунелі;

$A_{\text{с.тун}}$ - загальна площа поверхні навколо тунеля;

$T_{\text{ТЕЕ}}$ – температура теплоелектричного елемента з холодного боку;

U - загальний коефіцієнт теплопередачі між внутрішнім та зовнішнім повітрям тунелю;

$AH_{\text{поз}}$ – абсолютна вологість поза теплицею;

$AH_{\text{тун}}$ – абсолютна вологість повітря всередині тунелю;

Коефіцієнт конвективної теплопередачі між повітрям і радіатором в тунелі розраховується за допомогою числа Нусельта (Nu), числа Рейнольдса (Re) та Прандтля (Pr).

$$Pr = \frac{c_p * \mu}{k}$$

де μ – динамічна в'язкість повітря. $\mu = 18,37 * 10^{-6} \text{Па} * \text{с}$;

k – коефіцієнт теплопровідності повітря. $k = 26,24 * 10^{-3} \text{Вт}/(\text{м} * \text{К})$.

$$Re = \frac{p * F_i * D_r}{\mu * A_{\text{пер}}}$$

де D_r – гідрравлічний діаметр тунелю;

$A_{\text{пер}}$ – площа перерізу тунелю.

$$Nu = \frac{h * L}{k} = 0,664 * Re^{\frac{1}{2}} * Pr^{\frac{1}{2}}$$

де L – характерний розмір розсіювачі.

Виділення теплоти при конденсації $F_i * \lambda_{H_2O} * (AH_{\text{поз}} - AH_{\text{тун}})$ виділяється тільки тоді, коли температура повітря всередині тунелю нище температури точки роси, тобто абсолютна вологість насиченої водяної пари всередині тунелю нище абсолютної вологості повітря яке поступає ($AH_{\text{поз}} > AH_{\text{тун}}$).

Робота елемента Пельтьє описується простою моделлю – аперіодичною передатною функцією першого порядку з постійною часу 60 секунд. Це означає, що температура на виході не змінюється відразу, а поступово, з затримкою приблизно в 60 секунд. На вхід подається напруга, а на виході ми отримаєм різницю температур між гарячою і холодною сторонами елемента (позначається як ΔT). Коефіцієнт передачі (наскільки сильно температура змінюється при зміні напруги) дорівнює $k_{\text{ТЕС}} = 63/15,5$.

Це означає, що при максимальній напрузі 15, 5 В різниця температур може досягати 63 °С.

$$W_{\text{ТЕС}}(S) = \frac{63/15,5}{60s + 1}$$

Вентилятор описується простою моделлю – аперіодичною передатною функцією першого порядку з постійною часу 0,2 секунд. Вхідний сигнал це напруга, вихідний – потік повітря. Коефіцієнт передачі дорівнює $k_{\text{вент}} = 0,0133/12$, це відповідає максимальному потку 28,2 CFM = 0,0133 м³/с при напрузі 12 В по технічній характеристиці. Таким чином:

$$W_{\text{ТЕС}}(S) = \frac{0,0133/12}{0,2s + 1}$$

Отримавши ці функції, схема моделювання ситеми контролю температури та вологості теплиці була реалізована в MATLAB Simulink. Моделювання було проведено з наступними пропозиціями:

- температура повітря всередині тунелю однорідна;
- температура всієї площі радіатора дорівнює температурі охолод-женої сторони елемента Пельтьє;
- абсолютна вологість зовнішнього середовища не змінюється і дорівнює значенню при відносній вологості 50 % і температурі 35 °C, $AH_{\text{поз}} = 19,8 * 10^{-3} \text{ кг/м}^3$;
- максимальна потужність охолодження елементів Пельтьє дорівнює 280 Вт;
- темепература горячої сторони елементів Пельтьє збільшується на 5 К с кожним 1 В, але не більше ніж 20 К вище вихідної температури равдяки радіаторам, які підключені на горячих сторонах до кожного елемента Пельтьє.

Складання схеми моделювання

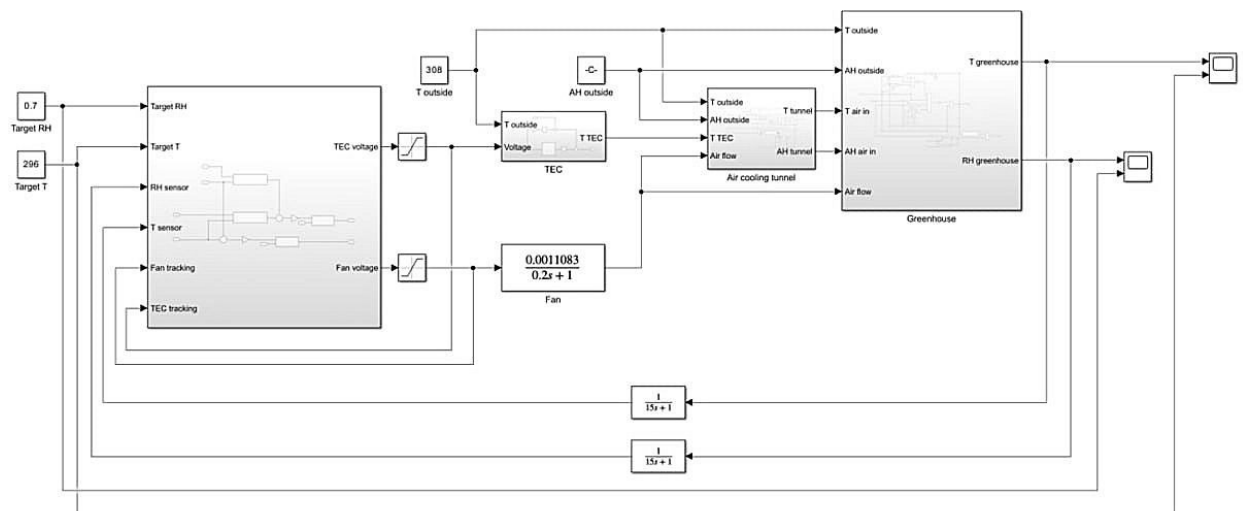


Рис.7.1 – Загальна схема моделювання вимірювання температури і вологості в MATLAB Simulink

Workspace	
Name	Value
A_cooler	0.9470
Ac	3.5000
Ac_tunnel	0.2176
Aci	3.9400
Asec_tunnel	0.0144
cp	1000
Dh	0.1200
eps_Ai	0.0300
eps_Sky	0.8500
k	0.0262
kl_fan	0.0800
kl_TEC	0.0050
kP_fan	5
kP_TEC	1
kT_fan	1
kT_TEC	1
L	0.0025
Lambda	2450000
mu	1.8370e-05
out	1x1 SimulationO...
Pr	0.7001
q_ET	-69
q_light	50
q_SR	29
rho	1.1840
sigma	5.6700e-08
U	0.4760
V_GH	0.5000
V_tunnel	0.0046

Рис.7.2 – Перелік змінних, використаних у моделюванні

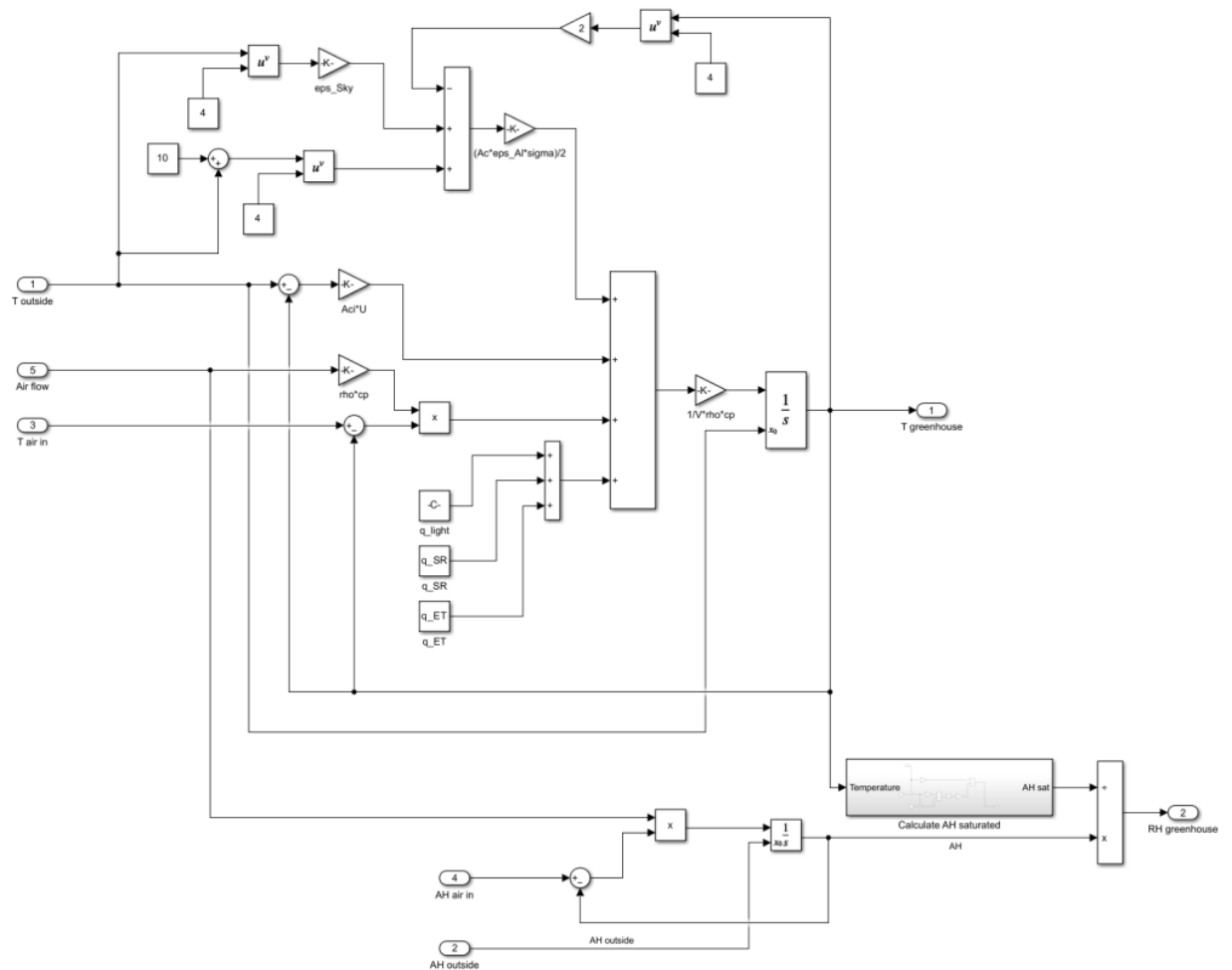


Рис.7.3 – Схема підсистеми моделювання процесів змінення температури та вологості всередині теплиці

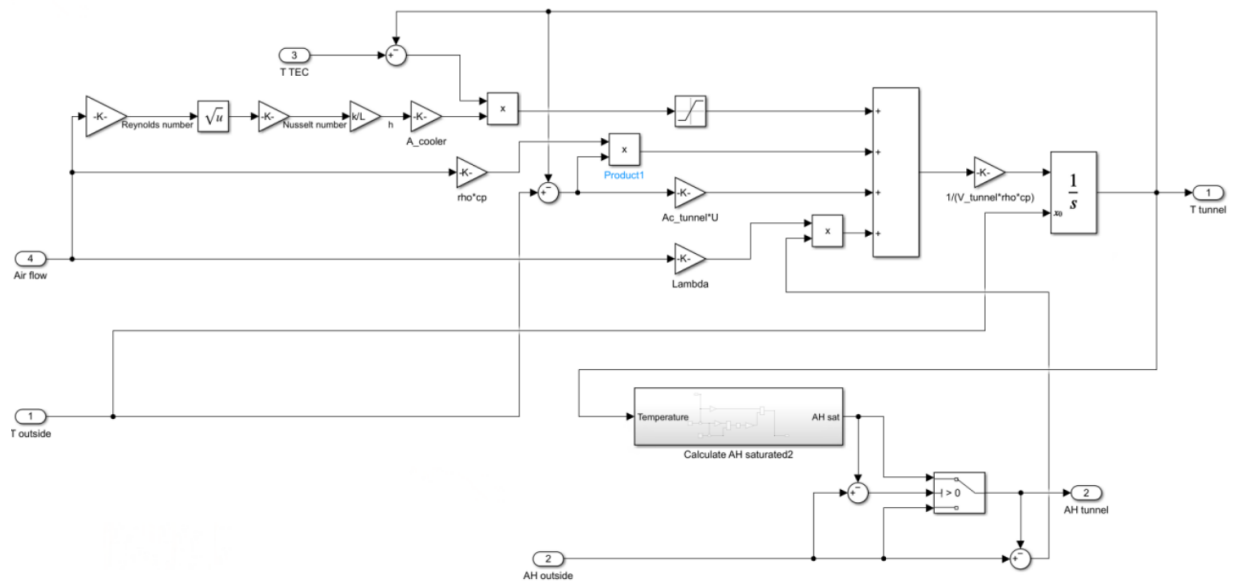


Рис.7.4 – Схема підсистеми моделювання процесів змінення температури та вологості всередині тунелю

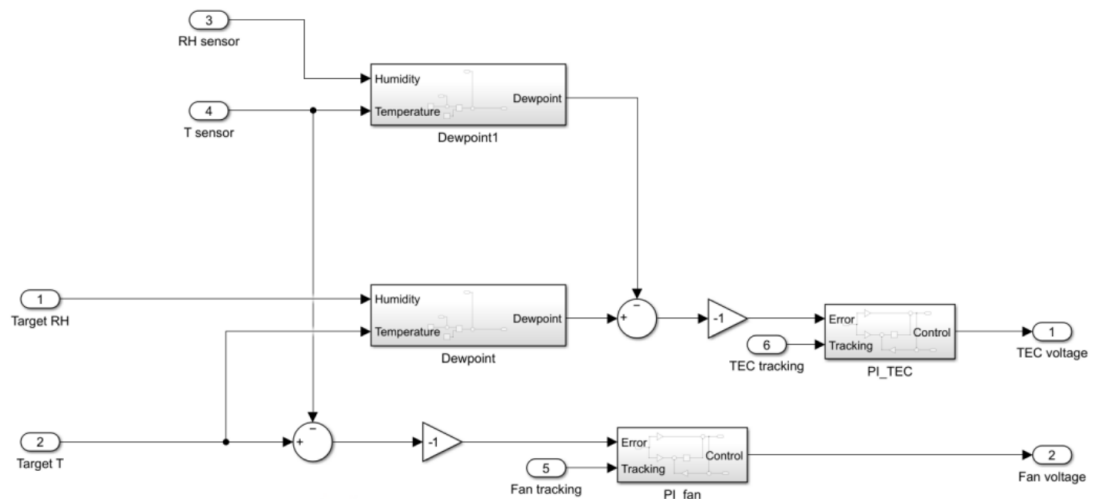


Рис.7.5 – Схема підсистеми моделювання контроллера

Результати моделювання

Результати моделювання при умові постійної температури повітря зовнішнього середовища $T_{\text{поз}} = 308 \text{ K}$ зображенні на рис.7.1.2. та рис.7.1.3.

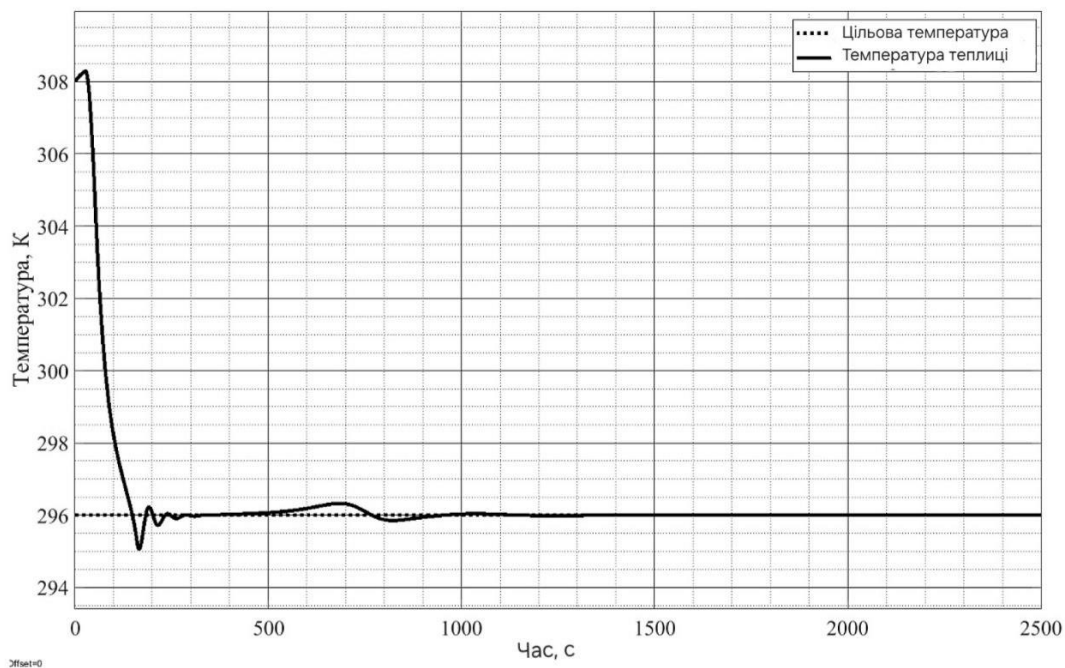


Рис.7.7 – Контроль температури при постійній температурі повітря поза теплицею 308 К

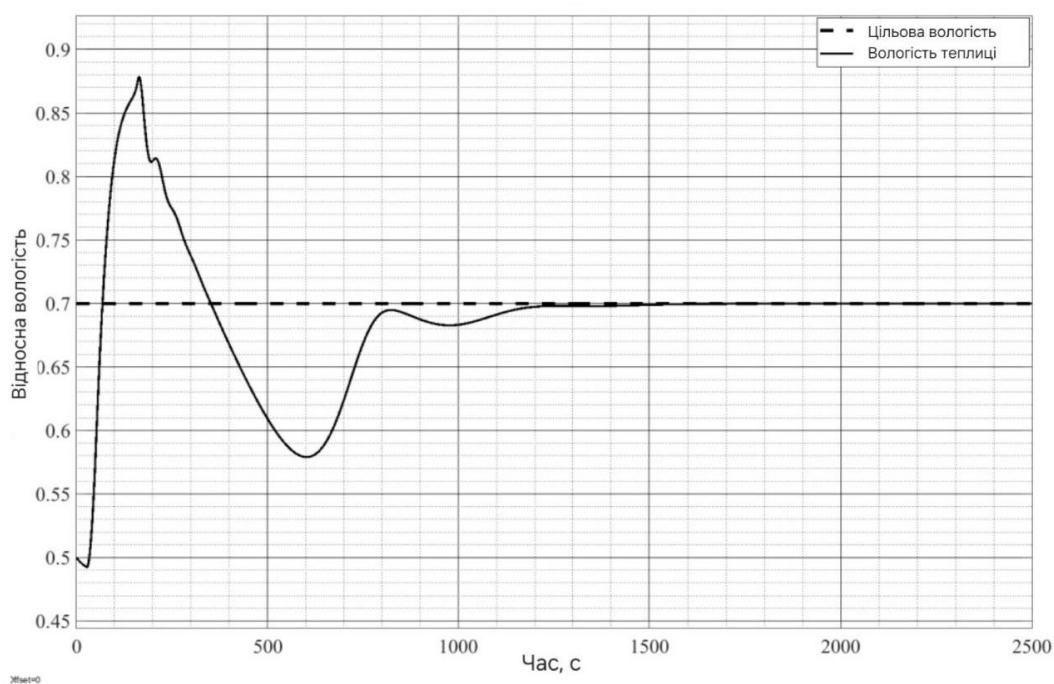


Рис.7.8 – Контроль вологості при постійній температурі повітря поза теплицею 308 К

Результати моделювання при зміні температури повітря поза теплицею зображенні на рис.7.9 та рис.7.10. Температура повітря змінюється від 209К до 308К з кроком 2К кожну годину (3600 с).

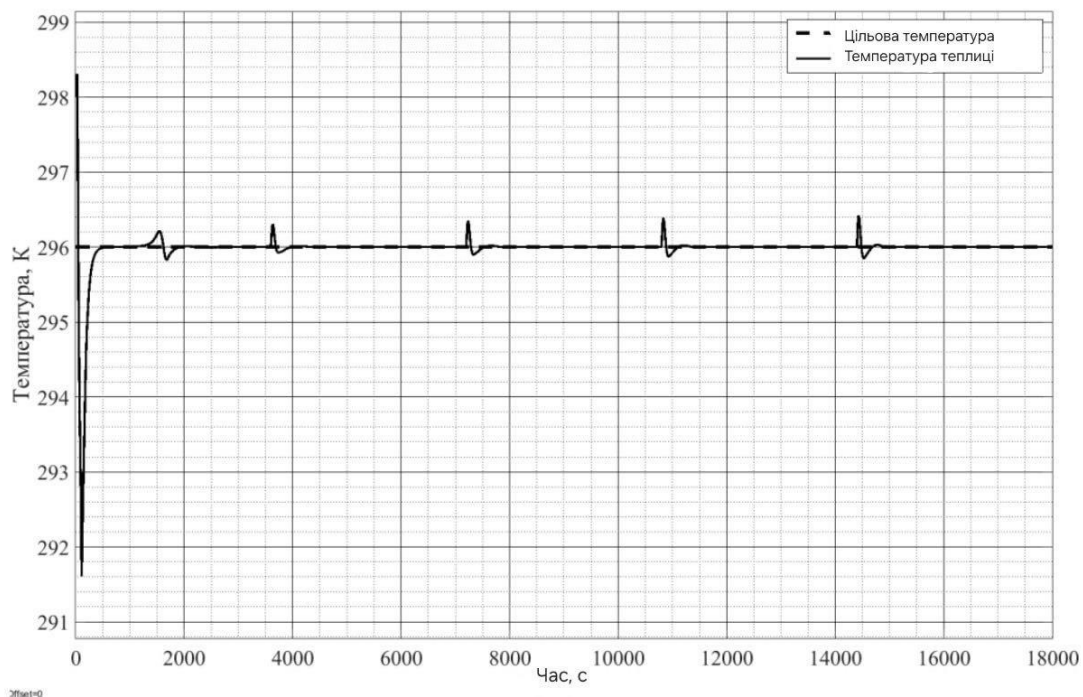


Рис.7.9 – Контроль температури при змінній температурі повітря поза теплицею від 298 К до 308 К

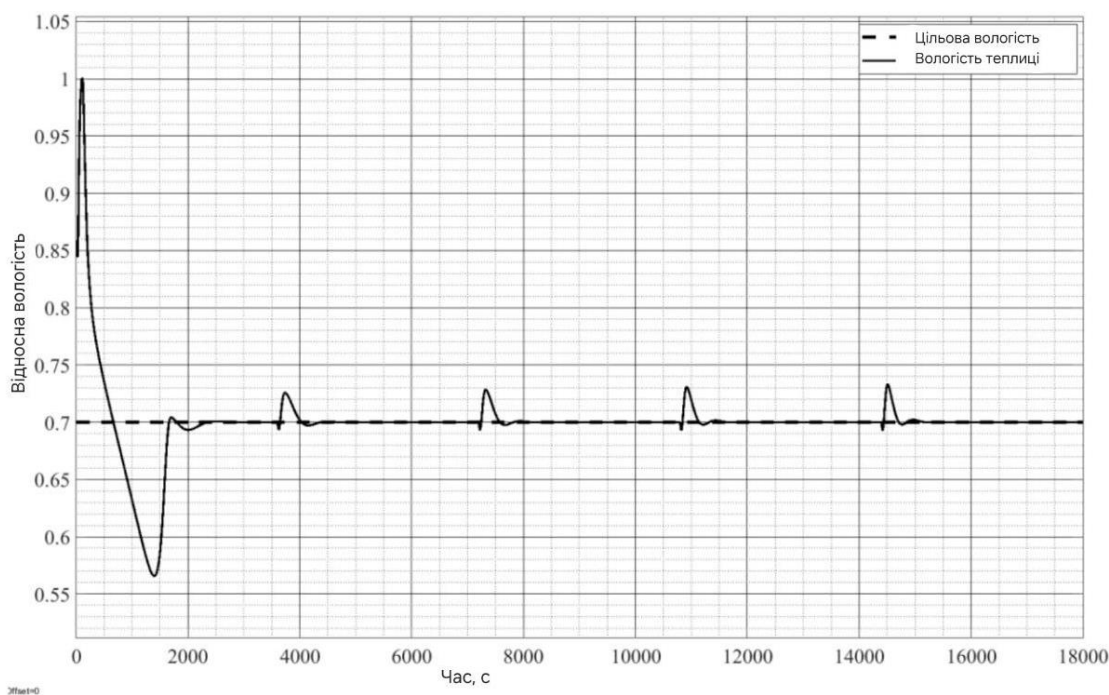


Рис.7.10 – Контроль вологості при змінній температурі повітря поза теплицею від 298 К до 308 К

На основі графіків, отриманих при моделюванні, побачили що система може підтримувати температуру та відносну вологість всередині теплиці на ідеальному рівні для суниці, температура 296 К і вологість 70%

Але час перехідного процесу великий, особливо коли система запустилась перший раз. Температура дійде до допустимого значення через 250 с, а вологість повітря досягне необхідного значення тільки через 1200 с.

При моделюванні в умовах нестабільної температури зовнішнього повітря, температура та вологість всередині теплиці мають певні короткі коливання. Але з часом ці значення швидко стають стабільними на бажаному рівні.

Значення ПІ-регуляторів, використаних у моделюваннях, були отримані емпіричним методом. Час перехідного процесу можна покращити за допомогою більш глибоким налаштуванням параметрів контролера.

7.2. Пропозиція щодо конструкцій теплиці

Теплиці уже давно використовують в цілях кламат-контролю для ціло-річного вирощування рослин. Особливо в країнах помірної клімату таких як Україна щоб уникнути впливу холоду на рослини. А також щоб уникнути таких факторів як ультрафіолетові промені, дощів, вітру, бурі, граду, смогу та ерозії смогу. Також здатність теплиці утримувати тепло в цьому випадку негативно впливає на рослини, оскільки влітку середня температура повітря майже завжди вище потрібного рівня.

Здатність утримувати тепло не пов'язана з парниковим ефектом [21]. Це пов'язано з матеріалом для покриття теплиць. Найбільш використовуваним матеріалом для покриття теплиці є пластик, а саме поліетилен, який рахується прозорим для інфрачервоного випромінювання. Головним принципом роботи теплиці полягає в обмеженні конвекції повітря. Протягом дня сонячне випромінювання нагріває теплицю як всередині так і зовні. Ґрунт за межами теплиці нагріває нижні шари повітря, яке завдяки конвекції піднімається та зміщується з холодним повітрям в верхніх шарах. Температура усередині теплиці нагрівається, але через обмежену циркуляцію, температура вище ніж зовні [22].

Тому щоб уникнути підвищення температури всередині теплиці можна зробити нову конструкцію. Цю теплицю потрібно використовувати разом з

гідропонною системою, яка знаходиться на висоті 1-1,2 м над землею. Теплиця складається з купола, який знаходиться вздовж водопровідних труб гідропонній системи. Така система допомагає обмежити підвищення температури через поглинання випромінювань землею. Оскільки купол теплиці накриває не всю теплицю, а лише невелику ділянку над самими рослинами, систему контролю температури і вологості набагато ефективніше. Це зменшує перепади температур, а це найголовніша проблема теплиць яка негативно впливає на ріст рослин [23]. Крім того, при подачі CO_2 така локальна система працює ефективніше і майже не має витрат[24].

Також головним плюсом таких систем є те що завдяки їх конструкції і розміру їх можна розміщувати не тільки на рівних поверхнях земні, а і на гористих.

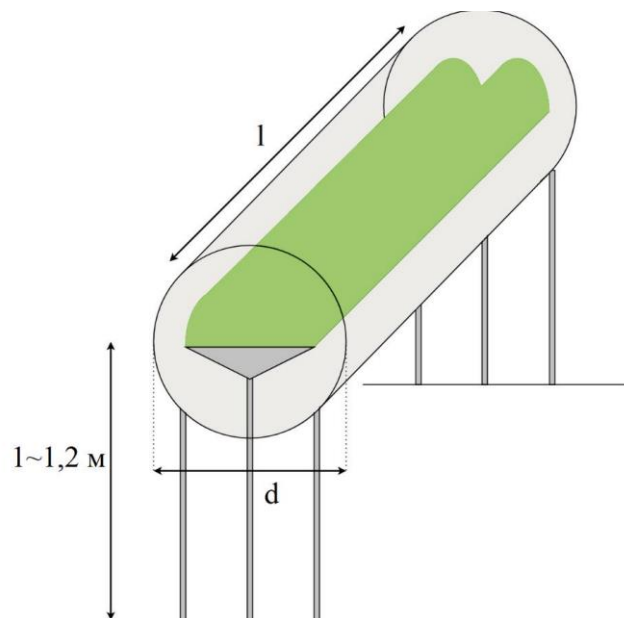


Рис.7.11 – Зображення теплиці

7.3. Проектування 3Д-моделі системи теплиці

На основі ідеї конструкції теплиці в минулих розділах, була розроблена 3Д-модель системи теплиці в програмному середовищі Autodesk Inventor.

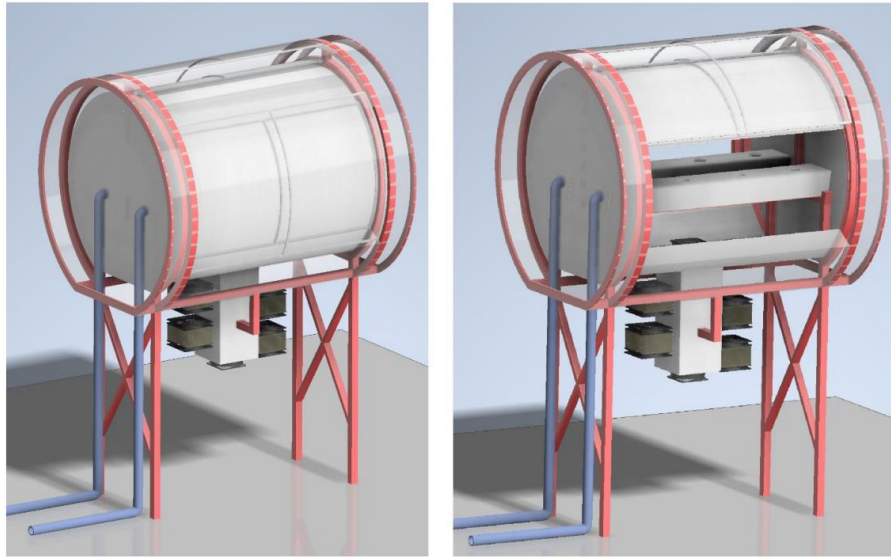


Рис.7.12 – Модель теплиці при повному закритті при роботі та відкритих бічних дверей для збирання врожаю та догляду за рослинами суниці в Autodesk Inventor

Хоча деталі 3Д-моделі можуть не відповідати дійсності, тим самим, вона дає загальне уявлення про концепцію комплексу теплиці для майбутнього розвитку.

7.4. Висновок до розділу

Було створенно математичні моделі та в результаті цього отримавши функції, було вирішено що схема моделювання ситеми контролю температури та вологості теплиці буде реалізована в MATLAB Simulink.

Склавши схему моделювання та отримавши результати стало зрозуміло що система може працювати в заданих зовнішніх умовах. Система потребує часу при початку використання для досягнення бажаного рівня. Система після досягнення бажаного рівня працює стабільно.

8. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

Для забезпечення надійного контролю мікроклімату в теплиці використовується комп'ютеризована система яка включає датчики температури та вологості, концентрації вуглекислого газу та кольору. Метою розрахунку є визначення похибок вимірювання для подальшого обрахування надійності системи.

Датчик HDC1080 (температура та вологість)

Температура

- Діапазон вимірювання: $-40^{\circ}\text{C} \dots +125^{\circ}\text{C}$
- Основна похибка (Δ_o): $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$
- Додаткова похибка (Δ_d): $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (зміна напруги / вологість)
- Квантова похибка (Δ_k):

Роздільна здатність 14 біт $\rightarrow$

$$\Delta_k = \frac{\Delta X}{2^n}$$

де ΔX – діапазон величини;

n – кількість бітів.

$$\Delta_k = \frac{125 - (-40)}{2^{14}} = \frac{165}{16384} \approx 0.010^{\circ}\text{C}$$

- Похибка дрейфу (Δ_s): $\pm 0.05^{\circ}\text{C}/\text{рік}$
- Алгоритмічна похибка (Δ_a): $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$

Підсумкова похибка:

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{0.4^2 + 0.05^2 + 0.4^2 + 0.01^2 + 0.05^2 + 0.05^2} \approx 0.42^{\circ}\text{C}$$

Вологість

- Діапазон вимірювання: $-0\% \text{RH} \dots +100\% \text{RH}$
- Основна похибка (Δ_o): $\pm 3.5^{\circ}\text{C}$
- Додаткова похибка (Δ_d): $\pm 0.5 \text{ RH}$
- Квантова похибка (Δ_k):

$$\Delta_k = \frac{100}{2^{14}} \approx 0.006\% \text{RH}$$

- Похибка дрейфу (Δ_s): $\pm 0.2 \%RH$
- Алгоритмічна похибка (Δ_a): $\pm 0.2 \%RH$

Підсумкова похибка:

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{3.5^2 + 0.5^2 + 0.006^2 + 0.02^2 + 0.2^2} \approx 2.7 \%RH$$

Датчик ENS160 (CO₂)

CO₂ (ідеальне значення в приміщенні 1000 ppm)

- Діапазон вимірювання: 400 ppm ... 65000 ppm
- Основна похибка (Δ_o): $\pm 3 \%$
- Додаткова похибка (Δ_d): ± 20 ppm (зміна вологості/температури)
- Квантова похибка (Δ_d): ± 5 ppm
- Похибка дрейфу (Δ_s): ± 10 ppm/міс
- Алгоритмічна похибка (Δ_a): ± 10 ppm

Підсумкова похибка:

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{3^2 + 20^2 + 5^2 + 10^2 + 10^2} \approx 126 \text{ ppm}$$

Датчик TCS34752 (RGB)

Для кожного кольорового каналу (16-біт)

- Діапазон вимірювання: 0 ... 65535 (16-бітне значення)
- Основна похибка (Δ_o): $\pm 1 \%$
- Додаткова похибка (Δ_d): $\pm 1 \%$ (освітлення, температури)
- Квантова похибка (Δ_d):

$$\Delta_k = \frac{65535}{2^{16}} \approx 1$$

- Похибка дрейфу (Δ_s): мінімальний $\approx 1 \%$
- Алгоритмічна похибка (Δ_a): $\pm 2 \%$

Підсумкова похибка (відносна):

$$\Delta_{\text{повн}} = \sqrt{1^2 + 1 + 1^2 + 1^2 + 2^2} \approx 2.4\%$$

9. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ

Комп'ютеризована система вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці включає в себе низку електронних компонентів, які працюють у складних умовах теплиці – підвищена температура та вологість. Тому для забезпечення стабільної роботи необхідно оцінити надійність її функціонування.

Надійність – властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників в заданих межах.

Ймовірність безвідмовної роботи – ймовірність того, що в межах вказаного періоду часу відмова пристрою не виникає.

Відмова – подія, яка полягає в порушенні працездатного стану об'єкта.

Середнє напрацювання до відмови – це математичне очікування напрацювання об'єкта до першої відмови.

Інтенсивність відмов – умовна щільність імовірності появи відмови.

Виріб використовуватиметься в таких умовах:

- Температура навколишнього середовища: від +5 °C до +35 °C
- Вологість повітря: до 95%
- Режим роботи: цілодобовий, тривалий
- Живлення: стабілізоване, 5 V / 12 V пост. струму

При розрахунку надійності системи потрібно визначити такі показники:

- ймовірність безвідмовної роботи системи за заданий час ($P(t)$);
- параметр потоку відмов (Λ);
- середнє напрацювання до відмови ($T_{\text{серед}}$).

Розрахунок параметра потоку відмовлень виробу проводиться по формулі:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i \quad (9.1)$$

де n – загальне число групи КВ, що входять до складу проектного виробу; $N_i \lambda_i$ – кількість і інтенсивність відмовлень КВ i -ої групи відповідно.

Інтенсивність відмовлень КВ i -ої групи в робочому режимі визначалася по формулі

$$\lambda_i = \lambda_{oi} a_i \dots a_n \quad (9.2)$$

де λ_{oi} – інтенсивність відмовлень КВ в номінальному режимі і нормальних умовах; $a_i \dots a_n$ – поправочні коефіцієнти, що враховують умови роботи (кліматичні і механічні впливи в залежності від призначення й умов майбутньої роботи), електричне навантаження КВ і температуру навколишнього середовища, ступінь інтеграції інтегральних мікросхем, а також співвідношення видів відмовлень.

Конкретні формули, по яких визначалися інтенсивність відмовлень кожної групи комплектуючих виробів, приведені в таблиці 8.2. Величини значень визначилися по довідковим даним з врахуванням вихідних даних для проектного виробу.

По формулі (9.1) визначаємо потік відмовлень виробу:

$$\Lambda = 31,355 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Таблиця 9.1 - Перелік комплектуючих виробів

Поз.	Найменування	Кіл	$\lambda_{io} \cdot 10^6$ год ⁻¹	Формула розрахунку λ_i	Коефіцієнти			$\Sigma \lambda_i \cdot 10^6$ год ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Одноплатний комп'ютер				a_1	a_2		
	Asus Tinker Board	1	8,6	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$	2,1	0,8		14,448
2	Мікроконтролер				a_1	a_2		
	Arduino Mega 2560	1	4,4	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$	2,1	0,8		7,344
3	Інтерфейсні мікросхеми				a_1	a_2	a_4	
	MAX485 (RS485-TTL)	3	3,8	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1	0,8	1	6,384
	P82B715	3	0,4	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1	0,8	1	2,016
4	Датчики							

	TCS34725	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$	2,1	0,8		0,504
	HDC1080	1	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$	2,1	0,8		0,504
	ENS160	2	0,3	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2$	2,1	0,8		1,008
5	Роз'єми	4	0,0101	$\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4$	2,1	1	1,3	0,110
6	Пайки	171	0,0101	$\lambda_0 \cdot a_{a_21}$	2,1			0,036
	Разом							31,355

Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t визначалася по формулі

$$P(t) = e^{-\Lambda t} \quad (9.3)$$

де Λ – параметр потоку відмовлень; t – час роботи виробу (год)

Дані розрахунку $P(t)$ приведені в таблиці 8.1.

Таблиця 9.2 - Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t

Час (год)	$P(t)$
1000	0,969
5000	0,855
10000	0,803
20000	0,731

Середній наробіток до відмовлення виробу визначався по формулі:

$$T_0 = \Lambda^{-1} \quad (9.4)$$

Підставляючи дані в формулу (9.4) одержимо

$$T = (31,355 \cdot 10^{-6})^{-1} = 31900 \text{ годин}$$

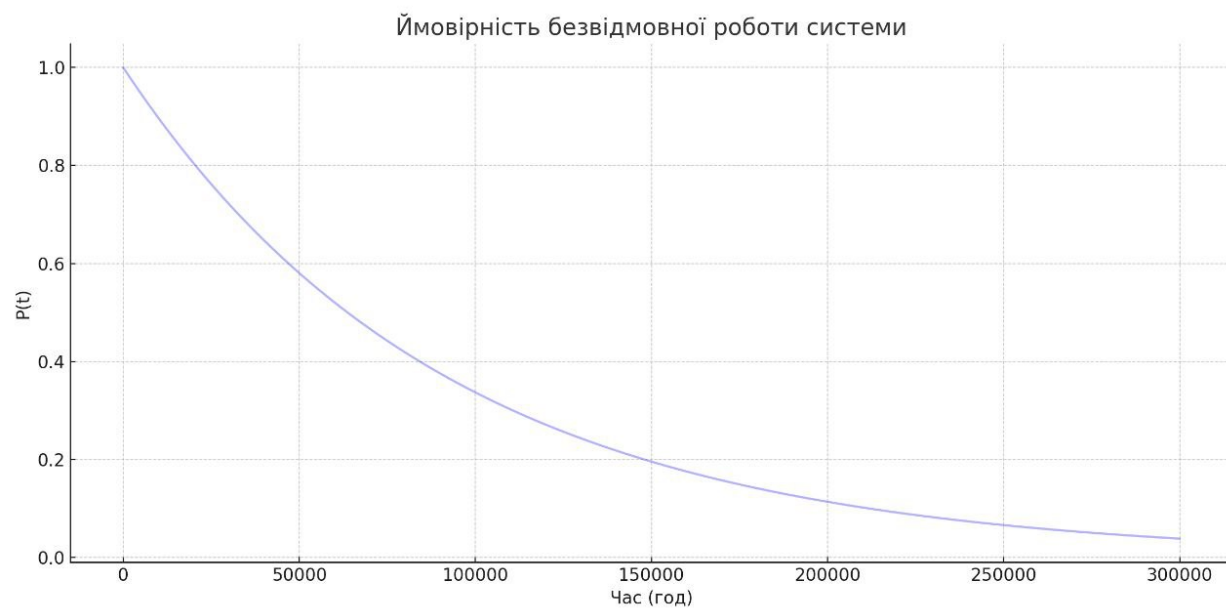


Рис. 9.1 Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу t

10. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

У процесі розробки та експлуатації комп'ютеризованої системи вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці потрібно враховувати вимоги безпеки життєдіяльності та охорони праці. Основними безпеками під час роботи з такою системою є ризик ураження електричним струмом, перегрів або коротке замикання електронних компонентів, вплив шкідливих мікрокліматичних факторів (висока температура, вологість), а також ймовірність пожежі.

Для забезпечення електробезпеки всі пристрої мають бути заземлені, підключені через автоматичні вимикачі з захистом від короткого замикання. Прилади, які експлуатують у вологому середовищі, повинні працювати на напрузі не вище 36 В. Обов'язковим є регулярне профілактичне обслуговування, перевірка справності елементів системи та ізоляції проводів.

Також увагу потрібно приділяти мікроклімату в теплиці, тому що висока температура та вологість можуть впливати не тільки на обладнання, але і на здоров'я персоналу. Для цього передбачається вентиляція, засоби індивідуального захисту, наприклад захисний одяг, рукавички та взуття.

Для запобігання пожежам забороняється використання пошкоджених або несертифікованих електроприладів. У приміщенні мають бути встановлені вогнегасники відповідного типу, а також, пожежна сигналізація. Персонал повинен буди ознайомлений з планом евакуації.

Причинами загоряння можуть бути:

- коротке замикання;
- несправність пристрою комп'ютера чи електромереж;
- недбалість оператора від час роботи з комп'ютером;
- перевантаження комп'ютера;

Табл.10.1 – Основні ДСТУ для пожежної безпеки при роботі з ПК

№	ДСТУ	Назва стандарту	Що регулює
---	------	-----------------	------------

1	ДСТУ EN 60950-1:2015	Обладнання інформаційних технологій. Вимоги безпеки	Пожежна та електробезпека комп'ютерів, моніторів, серверів
2	ДСТУ EN 50600-2:2021	Центри обробки даних. Пожежна безпека	Серверні кімнати, ІТ-інфраструктура
3	ДСТУ EN 13501-2:2017	Класифікація бєдівельних матеріалів за реакцією на вогонь	Оздоблення офісів, меблі, кабелі
4	ДСТУ EN 60332-1:2017	Кабелі. Випробування на горіння	Пожежна стійкість проводки в офісах
5	ДСТУ EN 50518:2016	Центри моніторингу безпеки. Вимоги пожежної безпеки	Високотехнічні приміщення з комп'ютерною технікою
6	ДСТУ EN 7240-1:2018	Пожежна сигналізація. Основні вимоги	Автоматична сигналізація в офісах, навчальних закладах
7	ДСТУ EN 54	Системи пожежної сигналізації та оповіщення	Вогнегасники, сирени, сповіщувачі

В Україні основоположним документом є Технічний регламент засобів забезпечення пожежної безпеки, затверджений постановою Кабінету Міністра України №1055 від 25 жовтня 2017 року. Основною метою регламенту є встановлення обов'язкових вимог до засобів пожежної безпеки. Це включає вимоги до конструкції, надійності, ефективності та безпечності протипожежної продукції, а також її сертифікації.

Усі працівники повинні пройти вступний та періодичний інструктаж з охорони праці. Документація з експлуатації обладнання, інструкції з безпеки та план евакуації повинні бути у вільному місці.

Таким чином, дотримання правил безпеки при використанні комп'ютеризованої системи вимірювання та контролю параметрів

мікроклімату в теплиці є важливою умовою ефективної, надійної та безпечної роботи як для персоналу, так і для обладнання.

ВИСНОВОК

В результаті кваліфікаційної роботи була розроблена комп'ютеризована система вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці.

В ході огляду матеріалів було вивчено характеристики суниці, методи її вирощування та біологічні особливості. Також були вивчені потенціали та недоліки вирощування суниці в Україні.

В ході виконання роботи було розглянуті існуючі методи регулювання параметрів мікроклімату і запропоновано нову конструкцію теплиці для використання з розробленою системою. Були проведені необхідні розрахунки потужності для системи та вибір відповідних компонентів для реалізації системи. Були розроблені структурна, функціональна та принципова схема. Також були розроблені алгоритми роботи системи.

Крім цього, для даної системи було проведено моделювання процесу регулювання температури та вологості повітря в середовищі MATLAB Simulink. Також була приведена 3Д модель, яка дає загальне уявлення системи теплиці для майбутнього розвитку.

Також була розрахована надійність системи та метрологічні характеристики.

Таким чином, в рамках кваліфікаційної роботи були реалізовані всі поставлені задачі, тож ціль роботи була досягнута.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Суниця садова [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://zemliak.com/kultury/8189-polunicya-sunicya-sadova> (дата звернення: 24.02.2025).
- 2) Огляд світового ринку свіжої полуниці [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/fresh-strawberry-market-25429> (дата звернення: 24.02.2025).
- 3) Global Fresh Strawberry Market Size Analysis 2023 Profoundly determine New Revenue Generation Techniques, Strategies and Forecast 2027 [Електроний ресурс] - Режим доступа: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/fresh-strawberry-market-25429> (дата звернення: 24.02.2025).
- 4) Виклики та можливості для вирощування суниці садової в Україні. Журнал "Ягідник" [Електроний ресурс]- Режим доступу до ресурсу: <http://www.jagodnik.info/vyklyky-ta-mozhlyvosti-dlya-vyroshhuvannya-sunytsi-sadovoyi-v-ukrayini/> (дата звернення: 24.02.2025).
- 5) Oguz, I. Recent Studies on Strawberries: Strawberry Cultivation Techniques / I. Oguz, N. Ibrahim Oguz, N. Ebru Kafka. – London : IntechOpen, 2022. – 278 p. – ISBN 978-1-80355-199-9. – DOI: 10.5772/intechopen.98136.
- 6) NGS, або нова технологія вирощування суниці [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу : <https://batkivsad.com.ua/1150/?srsId=AfmBOoqM7jYg3cPJzjHkh-vEhKKn9382tsVPDOAxD7ws1RFhowPpRGd0> (дата звернення: 24.02.2025).
- 7) Компанія Wilkin & Sons Ltd. [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tiptree.com/blogs/about-us/tiptree-farms> (дата звернення: 24.02.2025).
- 8) Суниця садова на аеропоніці [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://east-fruit.com/uk/plodoovochevyi-biznes/tekhnologii-uk/naukova-fantastyka-ni-prybutkovyy-biznes-sunytsya-sadova-na-aeroponitsi-u-vertikalniy-fermi-v-oae-video/> (дата звернення: 24.02.2025).

9) Гідропоніка для суниці [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://gradinamax.com.ua/ua/articles/gidroponika-dlya-polunici-urojay-bezgryadok?srsId=AfmBOooNvQxL3Sv7ZPwPOrcYK8MonxHXKsy3keenvU8fc6X2gAZ4CrF> (дата звернення: 24.02.2025).

10) Відкрили першу в світі вертикальну полуничну ферму [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hospodar.ua/post/6729-> (дата звернення: 24.02.2025).

11) Konsin, M. Influence of photoperiod and duration of short-day treatment on vegetative growth and flowering of strawberry / M. Konsin, I. Voipio, P. Palonen // The Journal of Horticultural Science and Biotechnology. – 2001. – Vol. 76. – № 1. – P. 77-82. – DOI: 10.1080/14620316.2001.11511330.

12) Xu, X. The Effect of Light Intensity on Vegetative Propagation Efficacy, Growth, and Morphology of "Albion" Strawberry Plants in a Precision Indoor Propagation System / X. Xu, R. Hernandez // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10. – DOI: 10.3390/app10031044.

13) Garcia, K. Physiology of strawberry plants under controlled environment: diurnal change in leaf net photosynthetic rate / K. Garcia, C. Kubota // Acta Horticulturae. – 2017. – P. 445-452. – DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1156.66.

14) Суниця садова: особливості вирощування [Електроний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://terratarisa.com/garden-strawberries-features-of-cultivation/> (дата звернення: 24.02.2025).

15) Bees are better for strawberries // Natures. – 2013. – Vol. 504 – P. 190. – DOI: 10.1038/504190b.

16) Miyoshi, Y. Effect of Local CO₂ Enrichment on Strawberry Cultivation during the Winter Season / Y. Miyoshi, K. Hidaka, T. Okayasu, D. Yasutake, M. Kitano // Environment Control in Biology. – 2017. – Vol. 55. – P. 165-170. – DOI: 10.2525/ecb.55.165.

17) Hidaka, K. Crop-local CO₂ enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations / K. Hidaka, S. Nakahara, D. Yasutake,

Y. Zhang, T. Okayasu, K. Dan, M. Kitano, K. Sone // *Scientia Horticulturae*. – 2022. – Vol. 301. – 111104. – DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111104.

18) Morrow, R. C. LED Lighting in Horticulture / R. C. Morrow // *HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science*. – 2008. – Vol. 43. – P. 1947-1950. – DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1947.

19) Choi, H. G. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber / H. G. Choi, B. Y. Moon N. J. Kang // *Scientia Horticulturae*. – 2015. – Vol. 189. – P. 22-31. – DOI: 10.2525/ecb.51.41.

20) Додатки вуглекислого газу для парникових газів [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/320438598_Effects_of_Local_CO2_Enrichment_on_Strawberry_Cultivation_during_the_Winter_Season.

21) Schroeder, D. V. An introduction to thermal physics / D. V. Schroeder – Boston: Addison-Wesley, 2000. – 442 p. – ISBN 978-0-321-27779-4.

22) Парниковий ефект [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_effect. (дата звернення: 10.04.2025)

23) Kutta, E. Improving Understanding of Microclimate Heterogeneity within a Contemporary Plant Growth Facility to Advance Climate Control and Plant Productivity / E. Kutta, J. Hubbard // *Journal of Plant Sciences*. – 2014. – Vol. 2. – P. 167-178. – DOI: 10.11648/j.jps.20140205.14.

24) Hidaka, K. Crop-local CO₂ enrichment improves strawberry yield and fuel use efficiency in protected cultivations / K. Hidaka, S. Nakahara, D. Yasutake, Y. Zhang, T. Okayasu, K. Dan, M. Kitano, K. Sone // *Scientia Horticulturae*. – 2022. – Vol. 301. – 111104. – DOI: 10.1016/j.scienta.2022.111104.

25) Перетворити люкс в PPFD - онлайн калькулятор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator> (дата звернення: 10.05.2025).

26) Merzlyak, M. N. Does a leaf absorb radiation in the near infrared (780–900 nm) region? A new approach to quantifying optical reflection, absorption and transmission of leaves / M. N. Merzlyak, O. B. Chivkunova, T. B. Melo, R. Razi Naqvi // *Photosynthesis Research*. – 2002. – Vol. 72. – P. 263-270. – DOI: 10.1023/a:1019823303951.

27) Acevedo, M. F. B. INFRARED SPECTROSCOPY OF LEAF TRAITS: Detecting plant stress and identifying plant species: Dissertation to obtain the degree of doctor / Maria Fernanda Buitrago Acevedo ; University of Twente. – Enschede, 2018. – 167 p

28) Hogewoning, S. W. Photosynthetic Quantum Yield Dynamics: From Photosystems to Leaves / S. W. Hogewoning, E. Wientjes, P. Douwstra, G. Trouwborst, W. van Ieperen, R. Croce, J. Harbinson. // *The Plant Cell*. – 2012. – Vol. 24. – P. 1921-1935. – DOI: 10.1105/tpc.112.097972

29) Kumar, S. V. Chemical transformations and changes in free volume holes in high-energy proton irradiated low-density polyethylene (LDPE) / S. V. Kumar, B. Ghadei, S. K. Chaudhuri, J. B. M. Krishna, D. Das, A. Saha // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2008. – Vol. 77. – P. 751-756. – DOI: 10.1016/j.radphyschem.2007.11.002.

30) Merzlyak, M. N. Estimation of leaf transmittance in the near infrared region through reflectance measurements / M. N. Merzlyak, T. B. Melo, K. Razi Naqvi // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* – 2004. – Vol. 74. – P. 145-150. – DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2004.03.003.

31) Slaton, M. R. Estimating Near-Infrared Leaf Reflectance from Leaf Structural Characteristics / M. R. Slaton, E. R. Hunt, W. K. Smith // *American Journal of Botany*. – 2001. – Vol. 88. – P. 278-284. – DOI: 10.2307/2657019.

32) The Engineering ToolBox [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://www.engineeringtoolbox.com/> (дата звернения: 26.05.2025).

33) Karn, A. An investigation into sky temperature estimation, its variation, and significance in heat transfer calculations of solar cookers / A. Karn, V. Chintala, S. Kumar // *Heat transfer*. – Vol. 48. – P. 1830-1856. – DOI: 10.1002/htj.21459.

34) Lopez, A. Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography / A. Lopez, F. D. Molina-Aiz, D. L. Valera // *Scientia Horticulturae*. – 2012. – Vol. 137. – P. 49-58. – DOI: 10.1016/j.scienta.2012.01.022.

35) Goddijn-Murphy, L. On Thermal Infrared Remote Sensing of Plastic Pollution in Natural Waters / L. Goddijn-Murphy, B. Williamson // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – DOI: 10.3390/rs11182159.

36) Kireva, R. Evapotranspiration with strawberries grown in drip irrigation conditions / R. Kireva, M. Mihov // *Mechanization in agriculture & Conserving of the resources*. – 2019. – Vol. 65. – P. 220-222.

37) Absolute Humidity Calculator [Электроний ресурс] - Режим доступа: <https://www.omnicalculator.com/physics/absolute-humidity> (дата звернення: 26.05.2025).

38) Monteith, J. L. Principles of Environmental Physics / J. L. Monteith, M. H. Unsworth – Amsterdam: Elsevier – 2008. – 401 p. – ISBN 978-0-12-386910-4

39) Pozzobon, V. Household aluminum foil matte and bright side reflectivity measurements: Application to a photobioreactor light concentrator design / V. Pozzobon, W. Levasseur, K. V. Do, B. Palpant, P. Perre // *Biotechnology Reports*. – 2020. – Vol. 25. – DOI: 10.1016/j.btre.2019.e00399

40) 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals - IP Edition / Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009 – 926 p. – ISBN: 978-1-933742-56-4.

41) Raspberry Pi 4 Model B 2019 [Электроний ресурс] - Режим доступа: <https://raspberrypi.vn/san-pham/raspberry-pi-4-model-b-2019> (дата звернення: 1.06.2025).

42) ASUS Tinker Board S R2.0 [Электроний ресурс] - Режим доступа: <https://tinker-board.asus.com/series/tinker-board-s-r2.html> (дата звернення: 1.06.2025).

43) Плата мікроконтролера Arduino Mega 2560 R3 [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://mehanika.net.ua/product/plata-mikrokontrolera-arduino-mega-2560-r3-atmega2560-usb-type-b/> (дата звернення: 1.06.2025).

44) RS-422 [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-422> (дата звернення: 1.06.2025).

45) RS485 [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/max485-konvertiruyuschiy-modul-dlya-arduiny.html>. (дата звернення: 1.06.2025).

46) P82B715TD Long Distance I2C Bus Extender I2C Mini Module[Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://store.ncd.io/product/p82b715td-long-distance-i2c-bus-extender-i2c-mini-module/>. (дата звернення: 1.06.2025).

47) AMT1001 Analog Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-analog-amt1001> (дата звернення: 1.06.2025).

48) Si7021 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-si7021> (дата звернення: 1.06.2025).

49) DHT22 Temperature Humidity Sensor Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-dht22> (дата звернення: 1.06.2025).

50) HTU21 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-htu21> (дата звернення: 13.06.2025).

51) АНТ20 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://arduino.ua/prod6017-modyl-datchikiv-temperatyrivologositisky-ah20bmp280> (дата звернення: 13.06.2025).

52) HDC1080 - Цифровий датчик вологості I2C [Електронний ресурс] - Режим доступа: <https://arduino.ua/prod6017-modyl-datchikiv-temperatyrivologositisky-ah20bmp280>. (дата звернення: 13.06.2025).

53) Омельчук Х.П., Подчашинський Ю.О., Чепюк Л.О.
Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів
теплиці для вирощування суниці. Тези Всеукраїнської науково-практичної
онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої
Дню науки, 12–17 травня 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025.
С. 32. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2.pdf>