

Шифр: СУНИЦЯ

**Комп'ютеризована система
вимірювання та контролю
параметрів мікроклімату в
теплиці для вирощування суніці**

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ	5
1.1. Методи вирощування суниці з застосуванням високих технологій в управлінні параметрами мікроклімату	5
1.2. Огляд комп'ютеризованих систем вирощування суниць	5
1.3. Фактори проектування системи вирощування суниці	10
1.4. Підходи до контролю параметрів мікроклімату в теплиці вирощування суниці	11
РОЗДІЛ ІІ. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕПЛИЦІ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ	14
2.1. Структурна схема системи	14
2.2. Елементна база системи	16
2.3. Розробка функціональної схеми системи	24
РОЗДІЛ ІІІ. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ	25
ВИСНОВКИ	28
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	29
ДОДАТОК	34

ВСТУП

Актуальність дослідження. У сучасному світі комп'ютеризовані системи відіграють дуже важливу роль в майже в усіх сферах життя, в тому числі у в сільському господарстві. Комп'ютеризовані системи вирощування рослин можуть зекономити людські сили та час, а головне – зменшити витрати водних та енергоресурсів, добрив. Наразі існує багато рішень даної проблеми і на цьому розвиток технологій не зупиняється.

Метою роботи є розробка комп'ютеризованої системи вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці.

Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких дослідницьких завдань:

- Зробити огляд особливостей вирощування суниці;
- Провести аналіз існуючих рішень у цій сфері, визначити їх принципи роботи, переваги та недоліки
- Розглянути структурну схему системи;
- Розробити алгоритм роботи системи;
- Вибрати елементну базу та вимірювальні засоби системи.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці.

Предметом дослідження є метрологічне забезпечення, в тому числі показники точності вимірювання параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці комп'ютеризованою вимірювальною системою.

Наукова новизна та практична цінність даного проекту полягає в:

- сформульовано вимоги, щодо умов вирощування суниці;
- розроблено алгоритм роботи системи;
- розроблено структурну та функціональну схеми системи;
- вибрано елементну базу та вимірювальні засоби системи.

Результати дослідження будуть апробовані у вигляді повідомлення на Всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції аспірантів, молодих

учених та студентів, присвяченої Дню науки, 12–17 травня 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025.

Основні положення та висновки дослідження буде відображено у 1 публікації – тези доповідей на всеукраїнській науково-практичній онлайн-конференції.

Структура і обсяг роботи. Наукова робота складається зі вступу, трьох розділів, що включають 7 підрозділів, висновків, списку використаних джерел та літератури (35 позицій), додатку (на 3 сторінках). Повний обсяг роботи становить 35 сторінок, основного тексту – 28 сторінок.

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ

1.1. Методи вирощування суниці з застосуванням високих технологій в управлінні параметрами мікроклімату

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 т.п. [1]. 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.

До недоліків цього метода можна віднести великі витрати: на інфраструктуру, на експлуатацію обладнання, на технічне обслуговування, на робітників, і т.п.

Загальна структурна схема сучасних систем управління мікрокліматом теплиці зазвичай має вигляд, показаний на рис. 1.1. В залежності від масштабу і конкретних бажаних цілей кожна система може мати свої коригування.

1.2. Огляд комп'ютеризованих систем 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 (рис. 1.2) [2].

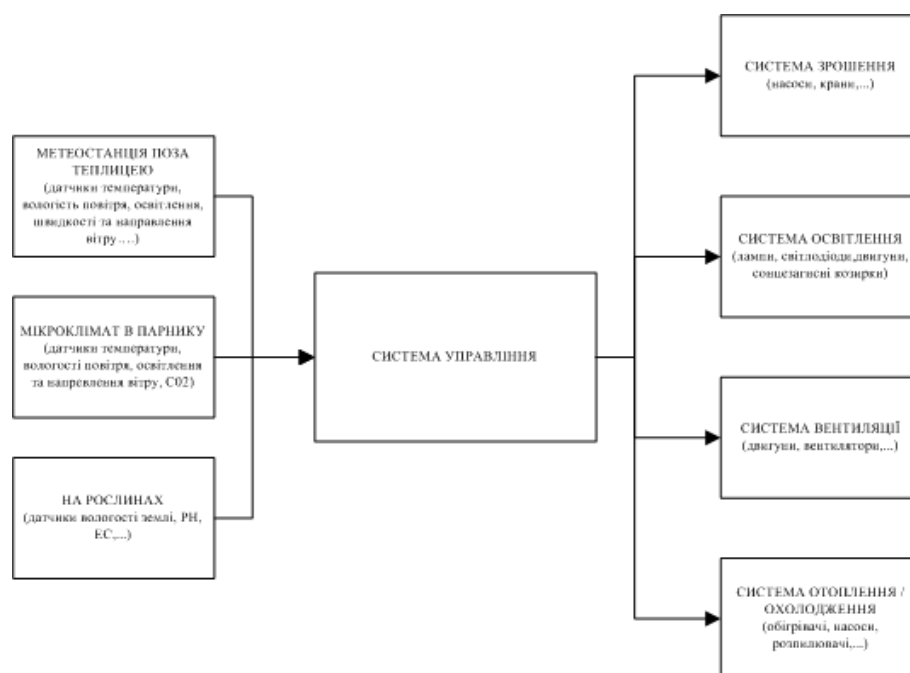


Рис. 1.1 – Загальна структурна схема системи управління параметрами мікроклімату теплиці.

Ця ідея дозволяє вирощування суниць під дашками, в тунелях або теплицях в субстрактах (з використанням кокосу, мінеральної вати і т.п.) Ця технологія наразі вивчається в Польщі, на відміну від піренейського півострова де ця система активно використовується.



Рис. 1.2 – Комп'ютеризована система вирощування суниць NGS.

Зазвичай цю систему використовують в закритому ґрунті – в блокових тунелях шириною 8-8,5 м і висотою 3 м. 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 спускаються, тим самим спрощуючи доступ до суниці. Кожен такий рукав може досягати до 50 метрів. Це великий прорив у технологіях вирощування.

В якості другого прикладу можна привести комп'ютеризовану систему вирощування компанії Wilkin & Sons Ltd. в Колчестері, Великобританії [3].



Рис. 1.3 – 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.

Аeropоніка

Також є дуже цікавий комп'ютеризований метод вирощування такий як aeroponіка. Цей метод, при якому суниця закріплена таким чином що її коренева система знаходиться у повітрі та отримує поживні речовини шляхом

розпилення водного розчину, збагаченого 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, використанні цього метода дозволяє вирощувати рослини у таких районах землі, як пустеля або тундра, які є непридатними для сільського господарства. На рис. 1.4. наведено приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу аеропоніки [4].



Рис. 1.4 – Розумна теплиця, створена з використанням методу аеропоніки

Недоліком аеропоніки можна вважати доволі складну систему встановлення, та великі фінансові витрати для купівлі спеціального 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. На рис 1.5 наведено приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу гідропоніки [5].



Рис. 1.5 – Розумна теплиця, створена з використанням методу гідропоніки

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 прополювання бур'янів.

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 порівняно з традиційним вирощуванням. На рис. 1.6 наведено приклад розумної теплиці, створеної з використанням методу вертикального господарства [6].



Рис. 1.6 – Розумна теплиця, створена з використанням методу вертикального господарства

1.3. Фактори проектування системи вирощування суниці

Світло. Суниця – світлолюблива рослина. Ідеальним часом освітлення для рослин суниці становить 12-13 годин на добу [7]. Згідно дослідженням [8], швидкість фотосинтезу 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 [9].

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 існує дефіцит 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 [10].

Вітер. Для мікроклімату теплиці вітер є важливим фактором, який впливає на інші фактори (температура та вологість). Окрім цього, для суниці вітер відіграє важливу роль у запиленні. Враховуючи це, в теплиці обов'язково повинна бути гарна вентиляція.

Комахи, які допомагають обпилюванню. Суниця може повністю обпилюватися тільки вітром. Але суниця яка обпилюється бджолами має біліші плоди і більш насичений червоний колір який приваблює користувача, більший термін придатності, правильне відношення цукру та кислоти, ніж плоди які обпилюються вітром [11]. Тому потрібно проектувати системи таким чином, щоб запилювачі (бджоли) мали вільний доступ до суниць.

Концентрація вуглекислого газу (далі CO₂). Концентрація вуглекислого газу – один із найважливіших факторів. Насичення повітря у теплиці CO₂ підвищує врожайність з 16 % до 40 % [12]. Концентрація CO₂ у повітрі повинна підтримуватися на рівні 800 ppm [13].

1.4. Підходи до контролю параметрів мікроклімату в теплиці вирощування суниці

Система повинна контролювати наступні параметри: рівень освітлення, температуру, вологість, рух повітря, подачу CO₂ і т.п.

1.4.1. 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.п. Однак все більше використовуються світлодіодні лампи які стали більш поширеними і використовуються в більшості високотехнічних систем вирощування. Такі лампи мають наступні переваги для освітлення теплиці [14]:

- можливість управління спектральним виходом системи освітлення;
- випромінюють не багато тепла і є можливість налаштування на інтенсивне освітлення;
- розраховані на тривале використання;
- вимкнення та увімкнення не потребую часу на розігрівання;
- економні витрати на довгий час;
- не містять ртуті;

Але не зважаючи на такі переваги, використання світлодіодних ламп обмежується їх високою вартістю.

Також при проектуванні системи освітлення, для економії коштів, потрібно використовувати світлодіод тільки одного кольору. Найкращий варіант – синій світлодіод. Дослідження [15] показало, що використання тільки синіх світлодіодів для освітлення дає високу продуктивність і незначну різницю порівняно зі змішаним використанням синіх та червоних світлодіодів.

1.4.2. Контроль температури, вологості повітря та вентиляції

Контроль температури, вологості та вентиляції, зазвичай виконує одна або кілька систем. Ці параметри мікроклімату 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.

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

1.4.3. Збагачення CO₂

Для збагачення концентрації CO₂ всередині теплиці можна використовувати джерела CO₂ які наведені в табл. 1.1 [16].

Таблиця 1.1 – 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 випаровують та
------------------------	--

	за допомогою допоміжного обладнання подають до теплиці. Через високу ціну техніки та контейнерів цей спосіб є витратним.
Генератор CO ₂	CO ₂ отримують в результаті згорання вуглеводневого палива. Даний метод можна використовувати в не великих теплицях, тому що несе в собі ризик того, що в процесі згорання при недостатній кількості кисню, можуть додатково утворюватися шкідливі домішки і потрібно додатково ставити фільтри для отримання чистого CO ₂ . Цей метод не тільки дорогий але й важкий у використанні.
Розпад ферментації	CO ₂ утворюється в результаті органічного 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. Є найдешевшим способом подачі CO ₂ у теплицю. Оскільки сухий лід має дуже низьку температуру, то найбільшим недоліком є важкість зберігання в нормальних умовах і швидка сублімація сухого льоду, що може привести 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 в результаті отримуємо малу концентрацію CO ₂ та багато витрат на харчову соду та кислоту.

РОЗДІЛ II. РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИМІРЮВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ МІКРОКЛІМАТУ В ТЕПЛИЦІ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ СУНИЦІ

2.1. Структурна схема системи

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 контролер – сервер для кожної теплиці. Ці клієнти відповідають за отримання керуючої інформації від сервера, отримання інформації про стан середовища 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 у 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, структурна схеми системи поділена на 3 рівня:

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

Загальна структурна схема комп'ютеризованої системи представлена на рис. 2.1. На схемі прийняті 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: баж – бажанні значення параметрів; т – значення параметрів всередині теплиці; б – значення параметрів в баку, в якому зберігається CO_2 ;

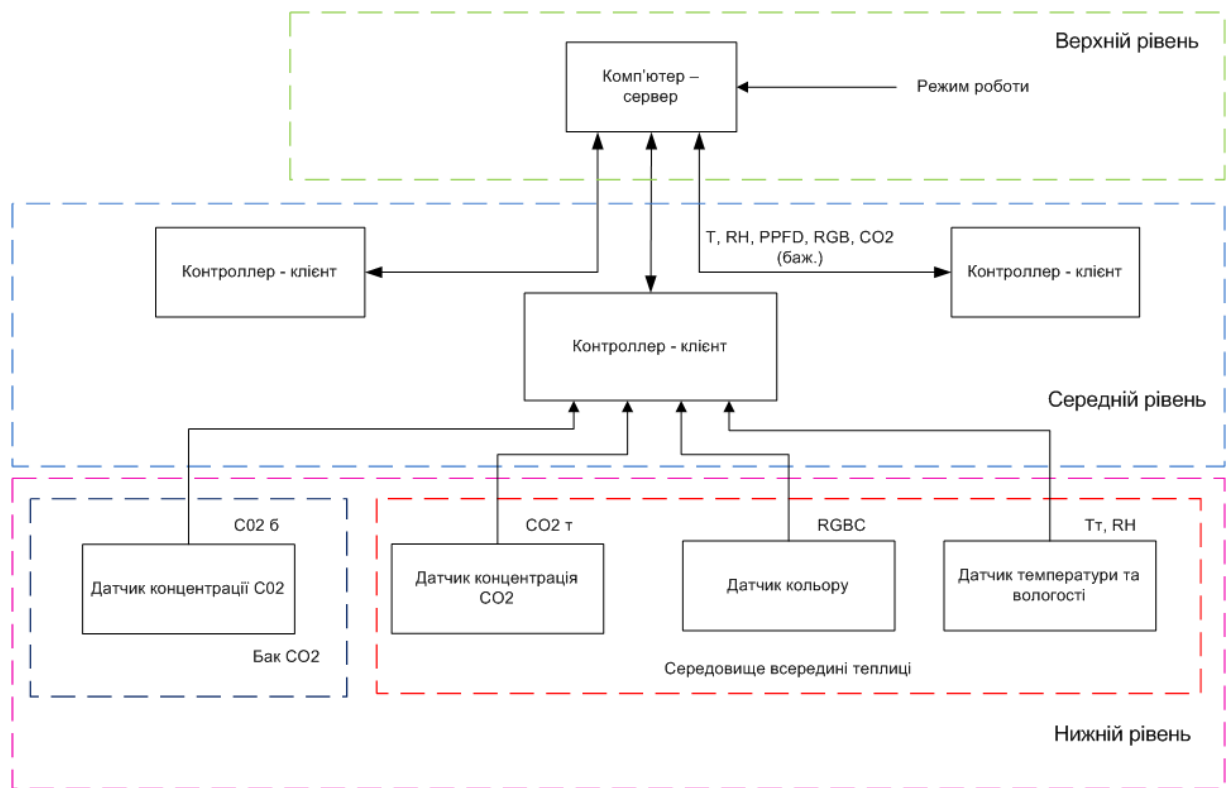


Рис. 2.1 – Структурна схема системи вирощування суниці

Структурна схема блоку обробки інформації комп'ютеризованої системи вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці наведена на рис. 2.2 [17].

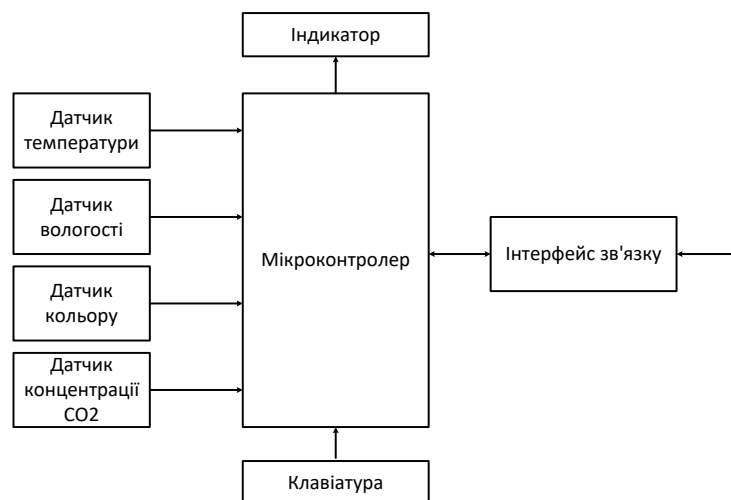


Рис. 2.2 – Структурна схема блоку обробки інформації комп'ютеризованої системи

2.2. Елементна база системи

2.2.1. Вибір засобу реалізації системи

Сервер

Сервер повинен мати можливість підключатись до великої кількості клієнтів. Також сервер повинен підключатися до монітора, щоб відслідковувати інформацію, а також для відображення інтерфейсу для установки користувачем параметрів системи та режимів роботи. Також потрібне підключення до Інтернету для збереження отриманої інформації з навколишнього 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 компактну, ізольовану платформу таку як одноплатний комп'ютер.

Найбільш популярною і доступною є Raspberry Pi 4 Model [18] і Asus Tinker Board (рис. 2.3) [19]. 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, Гбіт/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
Напруга живлення, В	5	5
Струм споживання, А	3	2,5
Підтримка операційної системи	Linux, Raspbian	Linux, Android
Ціна, грн.	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.

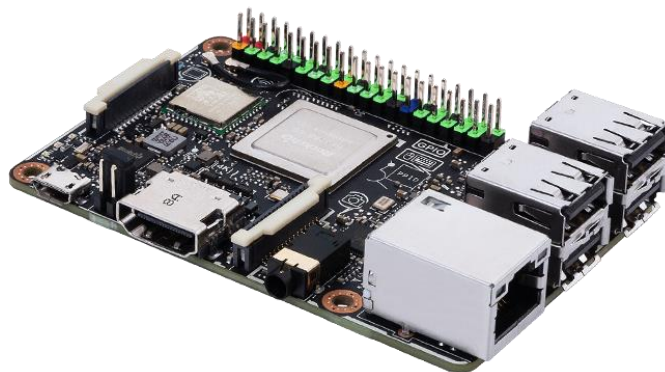


Рис. 2.3 – Asus Tinker Board R2.0.

Клієнт

На відміну від серверу, клієнт підключається і працює з датчиками і виконуючими пристроями і не потребує взаємодії з оператором. Платформа Arduino Mega 2560 (рис. 2.4) буде найкращим вибором, вона має велику кількість пінів вводу-виводу, ніж інші, що робить її придатною для використання в якості клієнта.

Основні характеристики Arduino Mega 2560 [20]:

- 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.

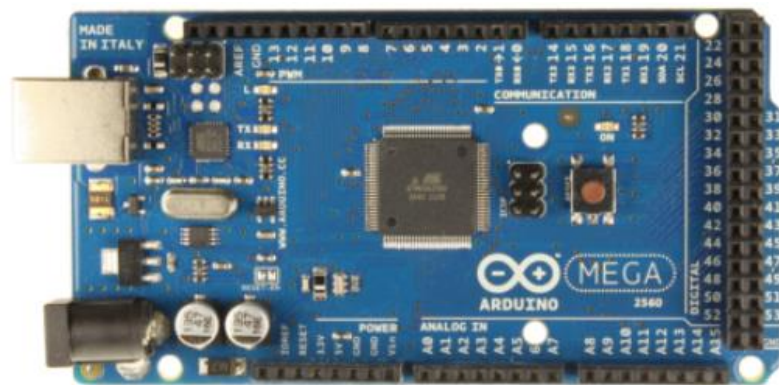


Рис. 2.4 – Arduino Mega 2560

Для взаємодії між клієнтом і сервером можна використовувати USB, 12С, UART і т.п. 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 [21] та RS-485 [22]. У табл. 2.1 наведено основні характеристики інтерфейсів RS-485 над RS-422.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики інтерфейсів RS-485 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 приймача/передавача
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 порту підключення протоколу RS-485, потрібно використовувати модуль перетворювача. Модуль RS485-TTL на MAX485 (рис. 2.5) здатний перетворювати сигнал TTL шини UART на RS485.

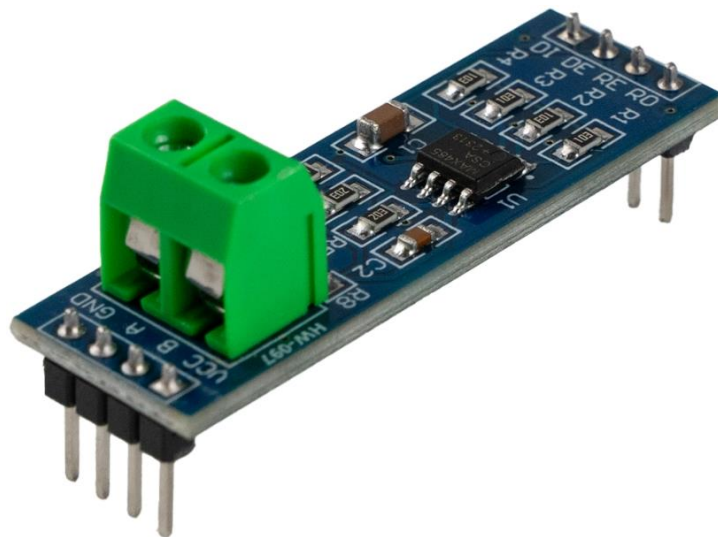


Рис. 2.5 – Конвертуючий модуль RS485- TTL на MAX485

Характеристики модуля RS485- TTL на MAX485 [22]:

- 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 контролера-клієнта, якщо теплиця великих розмірів. Тому на лініях з'єднання датчиків необхідно

використовувати модулі розширення щоб досягти потрібної відстані передачі даних. Для простоти в реалізації системи датчики повинні використовувати однаковий інтерфейс підключення. Будемо використовувати I2C інтерфейс, який підтримується великою кількістю різних датчиків. Він також підтримує підключення багатьох різних пристроїв до однієї і тієї ж пари сигнальних ліній і може бути легко розширений за допомогою модуля I2C Long Cable Extender на базі мікросхеми P82B715 (рис. 2.6).



Рис. 2.6 – Модуль I2C Long Cable Extender на базі мікросхеми P82B715

Характеристики модуля I2C Long Cable Extender P82B715 [23]:

- MultiDrop роздача сигналів I2C;
- подвійний, двох напрямлений, 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.

У табл. 2.2. наведено характеристики датчиків кольору TCS3200 [24] і TCS34725 [25].

Таблиця 2.2 – Характеристики датчиків кольору TCS3200 і TCS34725

	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

Вибираємо датчик TCS34725 (рис. 2.7), який відповідає вимогам по інтерфейсу підключення для використання в системі.



Рис. 2.7 – Датчик TCS34725

Датчик температури та вологості повітря

Існує дуже багато датчиків температури та вологості повітря, таких як AMT1001, Si7021, DHT22, HTU21, АНТ20, HDC1080 [26,27,28,29,30,31].

Характеристики датчиків наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Характеристики датчиків температури та вологості повітря

	AMT1001	Si7021	DHT22	HTU21	АНТ20	HDC1080
Робоча	4,75-5,25	1,9-3,6	3-5	1,5-3,6	2-2,5	2,7-5,5

напруга , В						
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 (рис. 2.8), оскільки він відповідає вимогам до робочої напруги і протоколу підключення і має найкращі характеристики для використання в системі.



Рис. 2.8— Датчик HDC1080

Датчик концентрації CO₂

Рівень CO₂ в середині теплиці не постійно збагачується, а з час від часу, що відповідає часу фотосинтезу рослин. Тому датчик концентрації CO₂ повинен мати достатню реакцію відгуку і короткий час нагріву, щоб його можна було б

використовувати в системі. Існує багато датчиків концентрації CO₂, таких як ENS160, CCS811, SEN0220, MN-Z19 [32,33,34,35]. Характеристики датчиків наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Характеристики датчиків 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 , 10 ⁻⁶	400-65000	400-8192	0-50000	0-5000
Похибка вимірювань, 10 ⁻⁶	50	50	50	50
Ціна, грн.	2248	847	7263	2179

Найбільше всього підходить датчик ENS160, який має хорошу продуктивність та відповідає протоколу підключення (рис. 2.9).



Рис. 2.9 – Датчик концентрації CO₂ ENS160

2.3. Розробка функціональної схеми системи

Функціональна схема системи наведена на рис. 2.10. В якості комп'ютера – сервера використовується одно платний 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.

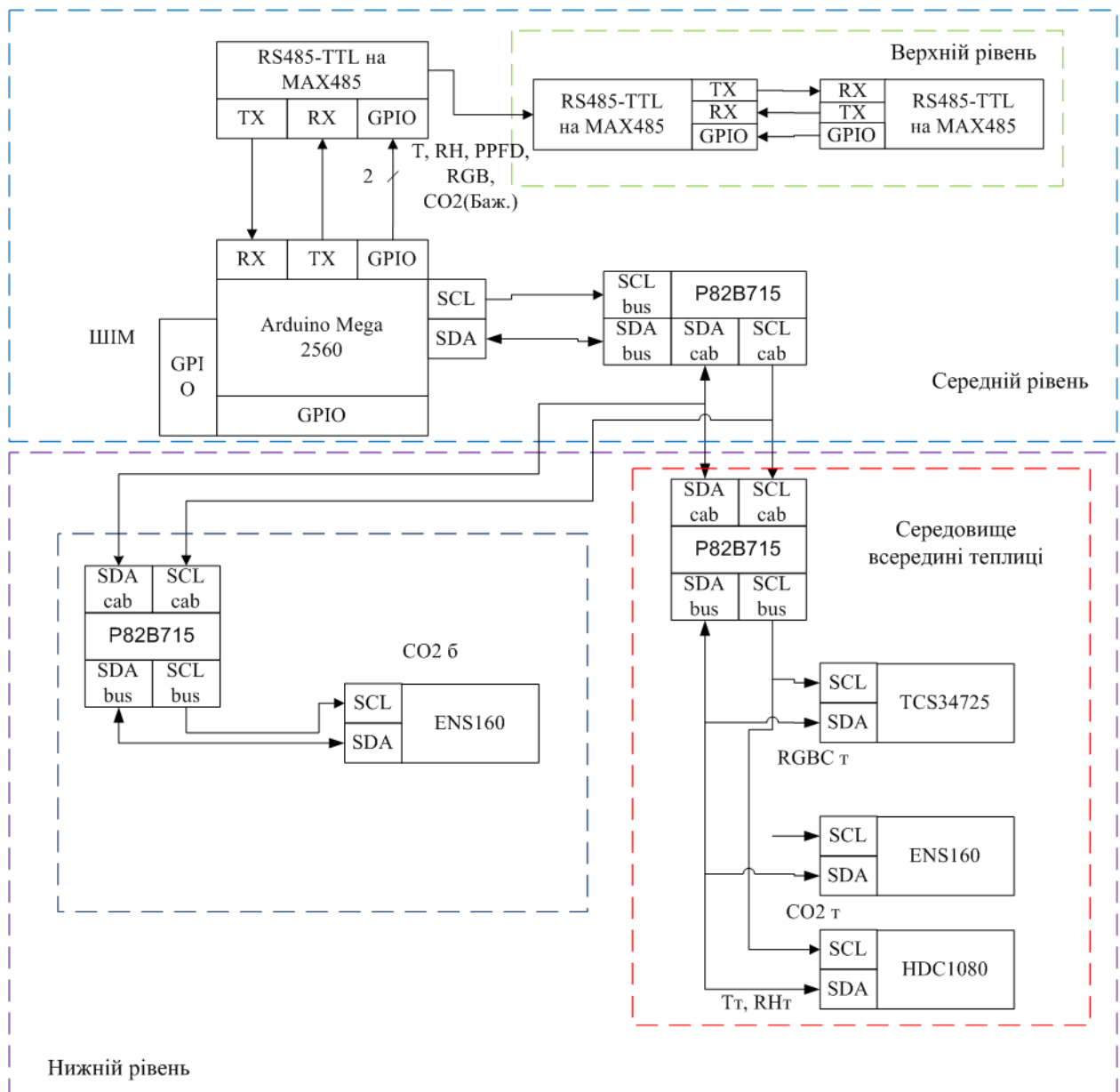


Рис. 2.10 – Функціональна схема системи

У додатку наведено блок-схему алгоритму роботи системи.

РОЗДІЛ III. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ І ВОЛОГОСТІ

Математична модель процесу вимірювання температури всередині теплиці була створена на основі моделі стаціонарного енергетичного балансу. 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 вважати 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

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

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 потоку 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 $AH_{\text{теп}}$, її зміни описуються так:

$$dAH_{\text{теп}} = (AH_{\text{вхід}} - AH_{\text{теп}}) * F_i * dt \Rightarrow \frac{dAH_{\text{теп}}}{dt} = (AH_{\text{вхід}} - AH_{\text{теп}}) * F_i.$$

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

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

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 в середині 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 тунелю 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 тунелю; $T_{\text{ТЕЕ}}$ – 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 – гідравлічний 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 розсіювача.

Виділення теплоти при конденсації $F_i * \lambda_{H_2O} * (AH_{\text{поз}} - AH_{\text{тун}})$ виділяється тільки тоді, коли температура повітря в середині тунелю нижче температури точки роси, тобто абсолютна вологість насиченої водяної пари всередині тунелю нижче 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 отримаємо 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 – 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:

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

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

ВИСНОВКИ

1. Розроблена комп'ютеризована система вимірювання та контролю параметрів мікроклімату в теплиці для вирощування суниці.
2. Було розглянуто методи вирощування та біологічні особливості суниці. Вивчені потенціали та недоліки вирощування суниці в Україні.
3. Розглянуті існуючі методи регулювання параметрів мікроклімату і запропоновано нову конструкцію теплиці для використання с розробленою системою.
4. Розроблені структурна і функціональна схеми та вибрана елементна база системи.
5. Розроблена математична модель процесу контролю температури і вологості в теплиці для вирощування суниці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Oguz, I. Recent Studies on Strawberries: Strawberry Cultivation Techniques / I. Oguz, H. Ibrahim Oguz, N. Ebru Kafka. – London : IntechOpen, 2022. – 278 p. – ISBN 978-1-80355-199-9. – DOI: 10.5772/intechopen.98136.
- 2) NGS, або нова технологія вирощування суниці [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://batkivsad.com.ua/1150/?srsltid=AfmBOoqM7jYg3cPJzjHkh-vEhKKn9382tsVPDOAxD7ws1RFhowPpRGd0> (дата звернення: 24.02.2025)..
- 3) Компанія Wilkin & Sons Ltd. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.tiptree.com/blogs/about-us/tiptree-farms> (дата звернення: 24.02.2025).
- 4) Суниця садова на аеропоніці [Електронний 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).
- 5) Гідропоніка для суниці [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://gradinamax.com.ua/ua/articles/gidroponika-dlya-polunici-urojay-bezgryadok?srsltid=AfmBOooNvQxL3Sv7ZPwPOrcYK8MonxHXKsy3keenvU8fc6X2gAZ4CrF> (дата звернення: 24.02.2025).
- 6) Відкрили першу в світі вертикальну полуничну ферму [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://hospodar.ua/post/6729-> (дата звернення: 24.02.2025).
- 7) 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.
- 8) 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.

9) 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.

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

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

12) 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.

13) 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.

14) 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.

15) 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.

16) 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. (дата звернення: 24.02.2025).

17) Омельчук Х.П., Подчашинський Ю.О., Чепук 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.

18) Raspberry Pi 4 Model B 2019 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://raspberrypi.vn/san-pham/raspberry-pi-4-model-b-2019> (дата звернення: 1.03.2025).

19) ASUS Tinker Board S R2.0 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://tinker-board.asus.com/series/tinker-board-s-r2.html> (дата звернення: 1.03.2025).

20) Плата мікроконтролера Arduino Mega 2560 R3 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://mehnika.net.ua/product/plata-mikrokontrolera-arduino-mega-2560-r3-atmega2560-usb-type-b/> (дата звернення: 1.03.2025).

21) RS-422 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-422> (дата звернення: 1.03.2025).

22) RS485 [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://iarduino.ru/shop/Expansion-payments/max485-konvertiruyuschiy-modul-dlya-arduiny.html>. (дата звернення: 1.03.2025).

23) P82B715TD Long Distance I2C Bus Extender I2C Mini Module [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://store.ncd.io/product/p82b715td-long-distance-i2c-bus-extender-i2c-mini-module/>. (дата звернення: 10.03.2025).

24) Датчик кольору TCS3200 GY-31 Arduino [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://beegreen.com.ua/datchik-koloru-tcs3200-gy-31-arduino-16660> (дата звернення: 10.03.2025).

25) Датчик розпізнавання кольору TCS34725 підтримка RGB I2C STM32 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://beegreen.com.ua/datchik-rozpiznavannya-koloru-tcs34725-pidtrimka-rgb-i2c-stm32-17860> (дата звернення: 10.03.2025).

26) AMT1001 Analog Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-analog-amt1001> (дата звернення: 11.03.2025).

27) Si7021 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-si7021> (дата звернення: 11.03.2025).

28) DHT22 Temperature Humidity Sensor Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-dht22> (дата звернення: 12.03.2025).

29) HTU21 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://hshop.vn/products/cam-bien-do-am-nhiet-do-htu21> (дата звернення: 13.03.2025).

30) АНТ20 Temperature Humidity Sensor [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod6017-modyl-datchikiv-temperatyrivologostitisky-aht20bmp280> (дата звернення: 13.03.2025).

31) HDC1080 - Цифровий датчик вологості I2C [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/prod6017-modyl-datchikiv-temperatyrivologostitisky-aht20bmp280>. (дата звернення: 13.03.2025).

32) ENS160 + BME280 - датчик чистоти повітря, температури, вологості та тиску - I2C - DFRobot SEN0335 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://sigma-market.com.ua/ua/p2525412170-ens160-bme280-datchik.html> (дата звернення: 13.03.2025).

33) Модуль датчика якості повітря (CCS811) [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/modul-datchyk-ikosti-povitria-ccs811_149861.html (дата звернення: 14.03.2025).

34) Датчик: атмосферний; вуглекислий газ (CO2) SEN0220; [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://www.tme.eu/ua/details/df-sen0220/klimatichni-datchiki/dfrobot/sen0220/> (дата звернення: 14.03.2025).

35) Модуль датчика углекислого газа МН-Z19 0-5000PPM
[Электронный ресурс] - Режим доступа до
ресурсу:https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/modul-datchyka-vuhlekysloho-hazu-mh-z19-0-5000ppm_167038.html (дата звернення: 14.03.2025).

ДОДАТОК

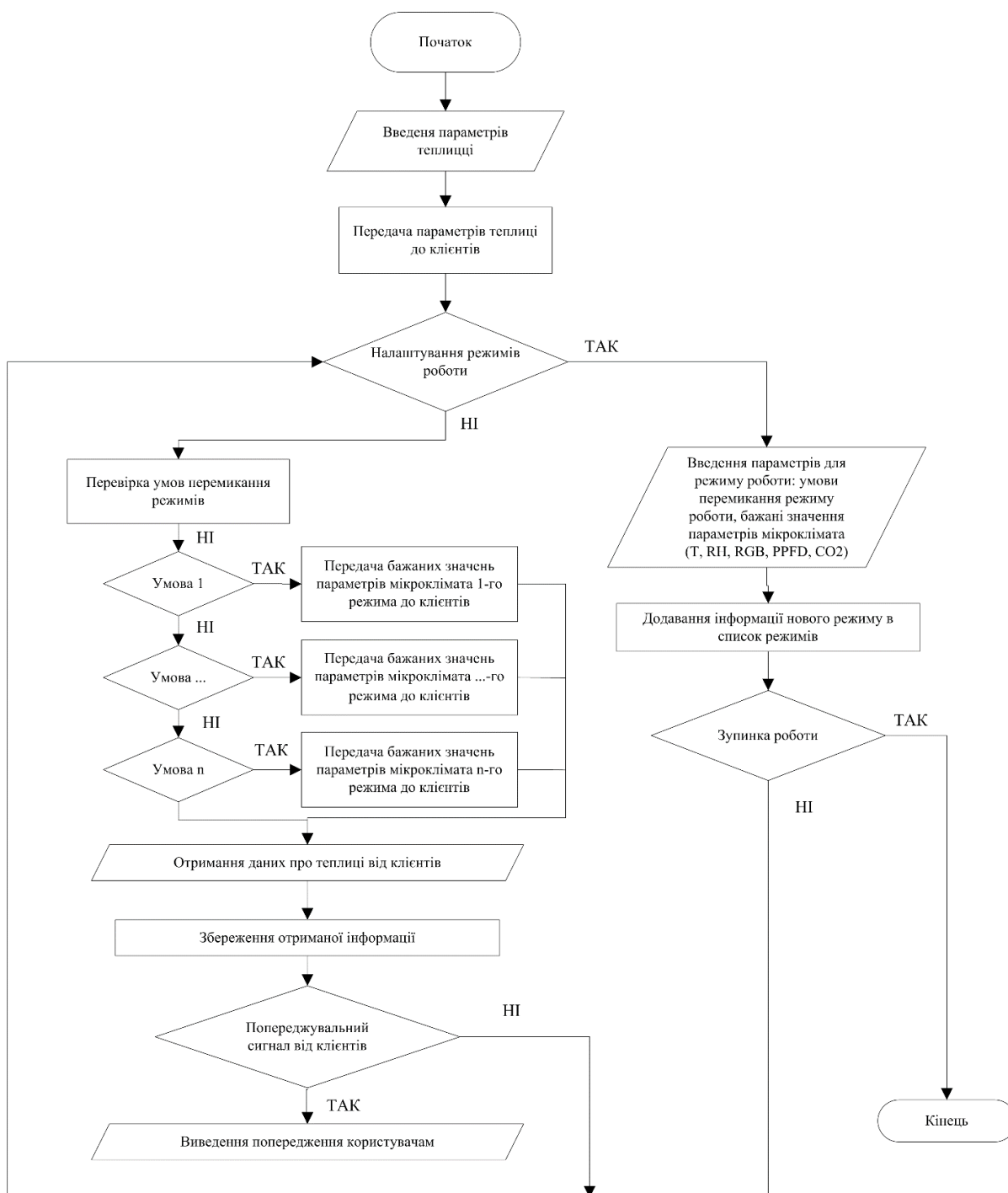
АЛГОРИТМ РОБОТИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

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.



Блок-схема алгоритму роботи системи