

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-28>

УДК 004.72

Багнюк Наталія Володимирівна, к.т.н., доцент<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>**Бортник Катерина Яківна**, к.т.н., доцент<https://orcid.org/0000-0001-5282-099X>**Лавренчук Світлана Василівна**, к.т.н., доцент<https://orcid.org/0000-0002-5453-3924>**Михальчук Микола Анатолійович**, магістрант

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА АВТОНОМНА СИСТЕМА ВЕНТИЛЯЦІЇ ТЕПЛИЦЬ З ДИСТАНЦІЙНИМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ УПРАВЛІННЯМ

Багнюк Н. В., Бортник К. Я., Лавренчук С. В., Михальчук М. А. Енергоефективна автономна система вентиляції теплиць з дистанційним інтелектуальним управлінням. В статті розроблено автономну систему вентиляції тепличної системи із живленням від сонячної енергії та дистанційним смарт-керування, яка включає сонячну панель, акумулятор та контролер заряду, вентилятор/обігрівач як виконавчі пристрої, сенсори температури та освітленості, контролер. При цьому програмна логіка керування інтегрована в середовищі Node-RED, реалізуючи зчитування показників температури та освітленості, алгоритм автоматичного включення/вимкнення вентиляції при перевищенні заданого порогу температури, аналіз рівня освітленості як умовного індикатора інтенсивності генерації сонячної енергії. Система забезпечує автономне енергоживлення системи шляхом оптимізації споживання електроенергії відповідно до наявного заряду та умов освітлення. Для цього необхідно розробити графічний інтерфейс для моніторингу параметрів у Node-RED, що дозволяє користувачу в реальному часі спостерігати за температурою, станом вентиляції та живлення та виконати тестування системи в умовах реальної теплиці, оцінити стабільність роботи, енергоефективність та адаптивність до змін кліматичних і енергетичних умов.

Ключові слова: програмний комплекс, візуальне програмування Node-Red, розумне керування.

Bahniuk N., Bortnyk K., Lavrenchuk S., Mykhalchuk M. Energy-efficient autonomous greenhouse ventilation system with remote intelligent control. The article develops an autonomous ventilation system for a greenhouse system powered by solar energy and remote smart control, which includes a solar panel, a battery and a charge controller, a fan/heater as actuators, temperature and light sensors, and a controller. At the same time, the software control logic is integrated into the Node-RED environment, implementing the reading of temperature and light indicators, an algorithm for automatically turning on/off ventilation when a given temperature threshold is exceeded, and analysis of the light level as a conditional indicator of the intensity of solar energy generation. The system provides autonomous power supply for the system by optimizing electricity consumption according to the available charge and lighting conditions. For this, it is necessary to develop a graphical interface for monitoring parameters in Node-RED, which allows the user to monitor the temperature, ventilation and power status in real time and perform system testing in a real greenhouse, assess the stability of operation, energy efficiency, and adaptability to changes in climatic and energy conditions.

Keywords: Software Tool, Node-Red visual programming, smart control.

Постановка наукової проблеми. У сучасних умовах зростання вартості енергоносіїв, глобальних кліматичних змін та потреби в сталому сільському господарстві, особливої актуальності набуває застосування енергоефективних і автономних технологій для керування агрооб'єктами. Теплиці потребують постійного контролю температурного режиму для підтримання оптимальних умов росту рослин. Водночас у багатьох регіонах обмежене або нестабільне енергопостачання.

Застосування сонячної енергії як джерела живлення, у поєднанні з IoT-технологіями та платформою Node-RED, дає змогу реалізувати автономні системи з низьким енергоспоживанням, які здатні динамічно адаптуватися до змін кліматичних умов. Такий підхід не лише знижує витрати на енергію, а й сприяє поширенню інтелектуальних агросистем у малих господарствах, фермерських кооперативах і в умовах віддалених районів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасних наукових дослідженнях [1-11] значна увага приділяється впровадженню технологій автоматизації процесів моніторингу та регулювання мікроклімату, розвиток смарт-технологій для підвищення врожайності сільськогосподарських культур, в т.ч. з застосуванням відновлювальних та економних джерел енергії. В контексті цього значного поширення набув також окремий напрямок створення оптимальних умов для росту та розвитку рослин у тепличних комплексах, для якого ефективна система вентиляції має ключове значення, адже завдяки автоматичній циркуляції підігрітого повітря можна ранньою весною зробити процес дозрівання культур більш раннім, а літом забезпечити ефективне охолодження та вентиляцію приміщення.

Одним із найбільш перспективних напрямів є використання систем автоматичного керування, що впродовж останніх років набули широкого поширення та продемонстрували високу ефективність [1-4]. Зокрема, у низці робіт [5-8] як інноваційні рішення запропоновано застосування IoT-платформ, бездротових сенсорних мереж та систем, зокрема у роботі [7] застосовано IoT-рішення для раннього виявлення червоного пальмового довгоносика. Такі системи складаються з множини сенсорних вузлів і виконавчих механізмів, об'єднаних бездротовими каналами зв'язку, що забезпечує дистанційний контроль параметрів навколишнього середовища та оперативне реагування на їх зміни. Як показано в [9-11], подібний підхід дозволяє здійснювати моніторинг і IoT-керування з будь-якої точки, що є особливо важливим для аграрного виробництва в умовах масштабних тепличних господарств.

В контексті цього розробка енергоефективних систем вентиляції для тепличних комплексів є важливим завданням сучасного агропромислового виробництва. Одним із перспективних напрямів є створення автоматизованих установок, що використовують відновлювані джерела енергії, зокрема сонячну енергію, для забезпечення оптимального мікроклімату в теплицях. Застосування фотоелектричних панелей у поєднанні з мікроконтролерними платформами (Arduino, Raspberry Pi тощо) дозволяє реалізувати автономну систему вентиляції, яка працює без підключення до централізованих енергомереж. Вентиляційні модулі можуть автоматично регулювати інтенсивність повітрообміну відповідно до показників температури, вологості та вмісту вуглекислого газу, що вимірюються за допомогою датчиків навколишнього середовища. Інтеграція алгоритмів «смарт-керування» забезпечує адаптивну зміну режимів роботи вентиляції залежно від погодних умов, добового циклу та фази росту рослин. Це дозволяє підтримувати стабільний мікроклімат у теплиці, що є критичним для оптимізації фотосинтетичної активності, підвищення врожайності та зниження ризику розвитку хвороб рослин. Використання сонячної енергії у таких системах не лише зменшує залежність аграрних господарств від традиційних джерел електроенергії, але й сприяє екологізації виробництва, скороченню викидів вуглецю та підвищенню енергоефективності. Таким чином, впровадження автономних установок вентиляції теплиць на базі сонячної енергії є перспективним напрямом у розвитку «розумного сільського господарства» (smart farming), що поєднує принципи відновлюваної енергетики, автоматизації та біотехнологій.

Перевага часто надається саме бездротовим сенсорним мережам, оскільки вони ефективно застосовуються не лише для контролю параметрів довкілля, але й у подієво-орієнтованих системах управління, де потрібна швидка реакція на зміни мікрокліматичних умов. Ураховуючи актуальні методології [1-5] та концепції сучасних кліматичних систем [6-11], зазначені технології знаходять застосування й у цій роботі для створення адаптивної системи моніторингу та регулювання клімату всередині теплиць. Необхідність таких рішень обумовлена зростаючим попитом на високоякісну сільськогосподарську продукцію та швидким розвитком аграрного сектору. Традиційні теплиці, зокрема в умовах приватного господарства, не завжди здатні забезпечити стабільний мікроклімат для рослин, особливо під час екстремальних коливань температури та вологості. Саме тому інтеграція автоматизованих систем контролю мікроклімату є ключовим фактором підвищення продуктивності та надійності тепличних технологій.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

Попри значні успіхи у впровадженні систем вентиляції тепличних комплексів, низка наукових і технічних проблем залишається невирішеною. Одним із ключових викликів є забезпечення енергонезалежності та стабільності роботи таких систем у періоди низької сонячної інсоляції (взимку або у хмарну погоду), коли продуктивність фотоелектричних панелей суттєво знижується. Це створює ризик надмірної залежності від додаткових традиційних джерел енергії (електромережа, дизельні генератори), що частково нівелює переваги відновлюваної енергетики.

Іншою важливою проблемою є висока собівартість енергоавтономних систем. Незважаючи на здешевлення сонячних панелей за останнє десятиліття, інтеграція фотоелектричних модулів із системами акумулювання енергії, контролерами та вентиляційними пристроями все ще вимагає значних початкових капіталовкладень. Для малих і середніх аграрних підприємств це є критичним бар'єром, що стримує масове впровадження подібних технологій. До того ж постає проблема оптимізації енерговитрат самої вентиляційної системи. Використання вентиляторів низької ефективності або відсутність алгоритмів інтелектуального керування призводить до перевитрати акумульованої енергії, що підвищує експлуатаційні витрати та знижує економічну доцільність таких установок.

Таким чином, актуальними напрямками подальших досліджень є розробка нових енергоефективних вентиляторів та алгоритмів адаптивного керування на основі IoT-технологій та сонячної альтернативної енергії, інтеграція дешевших акумулюючих систем із довшим терміном служби, створення модульних бюджетних рішень для малих тепличних господарств.

Подолання цих проблем дозволить не лише зменшити залежність від традиційних джерел енергії, але й зробити установки на основі сонячної енергії економічно доступними, що є ключовою умовою їх широкого застосування в аграрному секторі.

В контексті невирішених на даний час проблем в статті поставлена задача розробити автономну систему вентиляції тепличної системи із живленням від сонячної енергії та дистанційним смарт-керування, яка включає сонячну панель, акумулятор та контролер заряду, вентилятор/обігрівач як виконавчі пристрої, сенсори температури та освітленості, контролер. При цьому потрібно інтегрувати програмну логіку керування, реалізувавши зчитування показників температури та освітленості, алгоритм автоматичного включення/вимкнення вентиляції при перевищенні заданого порогу температури, аналіз рівня освітленості як умовного індикатора інтенсивності генерації сонячної енергії. Система повинна забезпечити автономне енергоживлення системи шляхом оптимізації споживання електроенергії відповідно до наявного заряду та умов освітлення, для цього необхідно розробити графічний інтерфейс для моніторингу параметрів, що дозволяє користувачу в реальному часі спостерігати за температурою, станом вентиляції та живлення та виконати тестування системи в умовах реальної теплиці, оцінити стабільність роботи, енергоефективність та адаптивність до змін кліматичних і енергетичних умов, підготувати технічну документацію та методичні рекомендації щодо впровадження подібних систем в умовах малих агропідприємств або приватних господарств та зробити висновки. Таким чином об'єктом дослідження є програмні засоби автоматичного керування мікрокліматом теплиці та технології Node-RED, що забезпечують візуальне програмування логіки управління на основі показників температури, рівня освітленості та стану енергоживлення.

Метою дослідження є розробити та впровадити автономну систему енергоощадного керування вентиляцією та обігрівом у теплиці на основі платформи Raspberry Pi з використанням сонячної енергії як основного джерела живлення. Система має враховувати кліматичні умови (температуру, освітленість) та стан енергоживлення, забезпечуючи автоматизовану реакцію на зміни мікроклімату з мінімальним споживанням енергії.

Завдання дослідження є розробити інтелектуальну систему автоматичного керування мікрокліматом теплиці, зокрема вентиляцією та обігрівом, що функціонує автономно на основі сонячної енергії.

Основна частина дослідження.

В даній статті описано розробку концепції установки системи обігріву та вентиляції теплиці на базі Node-RED, яка працює автономно від сонячної енергії, із врахуванням кліматичних та енергетичних умов. Метою є забезпечити енергоощадне керування вентиляцією в теплиці за допомогою платформи дистанційного керування з урахуванням температурних умов, рівня освітленості як індикатора генерації сонячної енергії, стану живлення від сонячної панелі.

Принцип роботи установки базується на температурному регулюванні. Якщо температура в теплиці більша заданого порогу (наприклад, 30 °C) – вмикається вентилятор. Якщо температура менша або рівна цього порогу – вентилятор вимикається. Датчик освітленості оцінює наявність сонячного світла. Якщо рівень освітленості нижчий за критичний поріг (наприклад, < 200 лк), вважається, що сонячна генерація закінчена, і вентилятор не запускається або вимикається для економії енергії.

Контроль живлення виконується з урахуванням наступного: контролер заряду відслідковує рівень заряду акумулятора та забезпечує безпечне живлення Raspberry Pi та вентилятора. Якщо напруга падає нижче критичного значення – вимикається навантаження і система переходить у енергозбереження.

Архітектуру та компоненти даної установки опишемо наступним чином.

Обчислювальна платформа базується на технології Raspberry Pi із встановленим програмним забезпеченням Node-RED. Автозавантаження Node-RED здійснюється при запуску системи. В установці використовуємо такі виконавчі пристрої як 5 В або 12 В вентилятор, керований через MOSFET/реле, ввімкнення/вимкнення – через GPIO Raspberry Pi. Система живлення складається з сонячної панелі (12-18 В), контролера заряду MPPT або PWM, акумулятора на 12 В, перетворювача 5 В (step-down buck) для живлення Raspberry Pi.

Основні блоки логіки включають температурний контроль, перевірку світла, перевірку напруги живлення, інтерфейсний вивід з наступними особливостями: температурний контроль (switch node визначає, чи перевищує температура заданий поріг); перевірка світла (якщо світла недостатньо (режим «ніч»), то вентилятор не вмикається); перевірка напруги живлення для захисту системи (якщо живлення критичне – вимикає вентиляцію); інтерфейс (dashboard) має такий основний функціонал як вивід температури, освітленості, статусу вентилятора, рівня напруги, кнопка «ручного режиму» для діагностики.

Інтерфейсний модуль Node-RED Dashboard здійснює вивід графіків температури, освітленості, напруги, індикаторів стану (вентилятор увімкнено/вимкнено), джерела живлення, кнопок управління через ручне керування/автомат, перезапуск.

Електронна схема блоку управління на базі Raspberry Pi показана на рис.1.

Перевагами такої архітектури системи є енергонезалежність, оскільки установка працює автономно без зовнішньої електромережі, економія ресурсу батареї завдяки тому, що вентилятор працює лише в сприятливих оптимальних умовах, простота масштабування через те, що можна в перспективі при потребі додати інші функції – зрошення, вентиляцію, сигналізацію. Система також має високу адаптивність через можливість змінювати функціональні межі прямо з веб-інтерфейсу. Можливе розширення стосується логування в базу даних (InfluxDB або Google Sheets), сповіщення у Telegram про критичні умови (перегрів, низька напруга), віддаленого моніторингу через VPN або хмарні сервіси.

Принципи роботи установки та блок-схема системи обігріву тепличного комплексу. Система обігріву теплиці побудована на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi, який здійснює збір, обробку та аналіз температурних даних від сенсорів, та, відповідно до заданих порогів, керує увімкненням/вимкненням нагрівального елемента. Взаємодія між компонентами реалізується за допомогою протоколів GPIO, а логіка управління – у середовищі Node-RED та Python-скриптами.

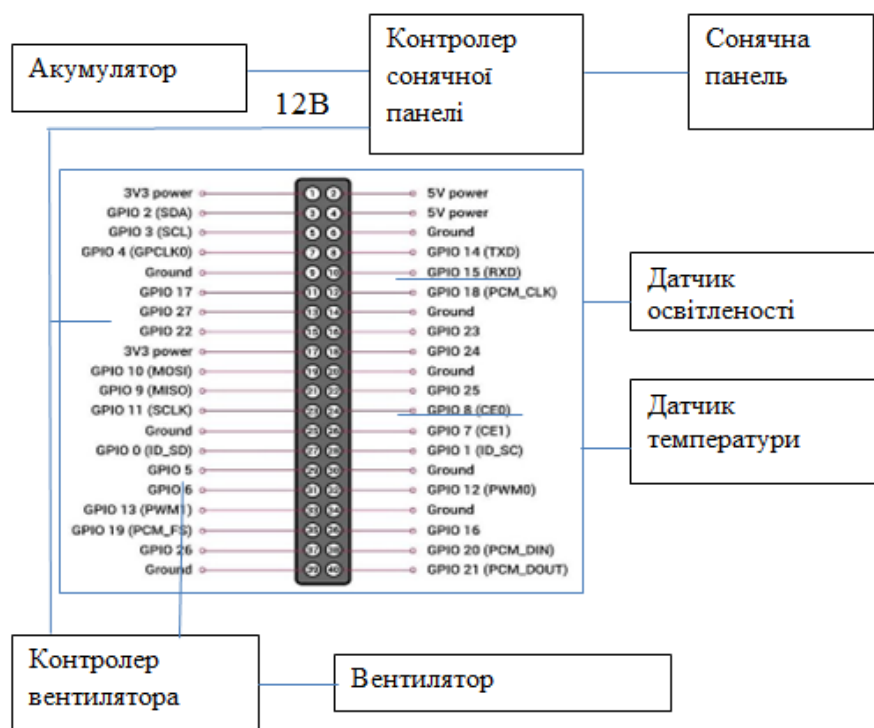


Рис. 1. Електронна схема блоку управління на базі Raspberry Pi

Принцип роботи системи базується на наступному: при температурі навколишнього середовища вище певного заданого значення включається вентилятор, а при пониженні – відключається. Живлення Raspberry Pi – автономне, від сонячної панелі/акумулятора контролюється контролером. Датчик освітленості також аналізує, чи достатньо енергії видають сонячні панелі. Якщо сонячний день закінчився – вентилятор відключається.



Рис. 2. Блок-схема обігріву теплиці

Основними блоками системи є (рис. 2) джерело живлення на базі сонячної панелі, що живить Raspberry Pi, датчики та виконавчі пристрої, це адаптер 5 В для Raspberry Pi та окреме джерело (12 В або 220 В) для нагрівача, пристрій Raspberry Pi, що включає центральний обчислювальний блок та обробляє дані від датчиків температури та приймає рішення про увімкнення обігріву. Також наявний температурний датчик, що встановлений у теплиці для постійного моніторингу температури повітря, який підключається до GPIO-порту Raspberry Pi та блок керування (рис. 3) реле, що приймає сигнал від Raspberry Pi, вмикає або вимикає нагрівальний елемент (обігрівач, ТЕН, ІЧ-обігрівач тощо), ізолює високовольтну частину від Raspberry Pi. Нагрівач, що зв'язаний з джерелом тепла в теплиці, керується реле на основі сигналу з Raspberry Pi. Інтерфейс користувача розроблений на базі Node-RED Dashboard, він відображає температуру, стан системи обігріву, дозволяє вручну керувати нагрівачем, задавати пороги. Логіка контролю спроектована на базі Node-RED, вона аналізує показники з датчиків, вмикає реле, якщо температура нижча за заданий поріг, вимикає реле, якщо температура вища або рівна верхньому порогу. Система оснащена мережевим мобільним сповіщенням – за допомогою Telegram-бота.



Рис. 3. Блок-схема управління

У цій статті використовуємо монокристалічну сонячну панель AX-50M виробництва Ахіота Energy, призначену для автономного живлення невеликих електроспоживачів. Основні технічні характеристики її наступні: номінальна потужність 50 Вт, напруга на холостому ході (V_{oc}) 22,3 В, напруга на робочій точці (V_{mp}) 18,0 В, ККД $>17\%$, розміри $670 \times 540 \times 30$ мм, тип осередків – монокристал кремнію. Панель застосовується в даній установці і може стабільно забезпечувати енергією мікроконтролери, датчики та виконавчі пристрої в умовах відсутності централізованого електропостачання.



Рис. 4. Сонячна батарея 50 Вт моно

Опишемо особливості використання технології Node-RED для розроблюваної установки обігріву та контролю клімату в теплиці. Автоматизація цих процесів є ключовим чинником підвищення ефективності теплиці, зменшення енерговитрат та забезпечення стабільної якості продукції. Одним із перспективних інструментів для реалізації розроблюваної системи обігріву та моніторингу клімату є технологія Node-RED – візуальне середовище розробки, що базується на платформі Node.js і дозволяє створювати потоки обробки даних у вигляді графічних блок-схем. Node-RED забезпечує гнучкий механізм інтеграції з різними датчиками (температури, вологості, освітленості, вуглекислого газу тощо), контролерами, а також виконавчими пристроями – обігрівачами, вентиляторами, насосами для зрошення. Завдяки підтримці протоколів MQTT, Modbus, HTTP та ін., платформа може взаємодіяти з широким спектром пристроїв Інтернету речей (IoT), що забезпечує централізоване управління мікрокліматом у теплиці. Ключовими функціональними можливостями Node-RED у даній установці є реалізація алгоритмів керування на основі умовних логічних блоків – наприклад, автоматичне вмикання обігрівача при зниженні температури нижче заданого порогу, графічне відображення параметрів середовища в реальному часі з використанням дашбордів (Node-RED Dashboard), що дозволяє оперативно реагувати на зміни. Важливим є запис і аналіз історичних даних, що сприяє оптимізації режимів опалення та вентиляції та можливість віддаленого керування через веб-інтерфейс або мобільні пристрої. Ефективність використання Node-RED у тепличних умовах була підтверджена численними відомими дослідженнями та експериментальними впровадженнями. За умови правильної калібровки датчиків і налаштування сценаріїв обігріву, така система дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання (до 20-30 %) без погіршення умов росту рослин.

Таким чином, застосування Node-RED у розроблюваній установці є доцільним і перспективним напрямом розвитку цифрового сільського господарства. Відкритість платформи, її сумісність з апаратними компонентами різного рівня складності, а також низький поріг входження роблять її доступною як для промислових агрокомплексів, так і для невеликих фермерських господарств. Це є однією з найбільш адаптивних платформ для створення систем керування мікрокліматом у теплицях, це середовище розробки з відкритим вихідним кодом, що дає змогу проєктувати логіку обробки даних у вигляді блокових схем. Технологія дозволяє об'єднувати численні датчики, виконавчі пристрої та хмарні сервіси через інтерфейс потокового програмування. Це значно полегшує створення адаптивних систем керування теплицею навіть для користувачів без глибоких знань у галузі програмування.

У даній роботі Raspberry Pi OS виступає як ефективне середовище для програмування датчиків у рамках IoT-систем та проєктів автоматизації. Поєднання гнучкості операційної системи Linux з можливостями апаратної платформи Raspberry Pi дозволяє розробляти як прості прототипи, так і масштабовані розподілені системи збору даних. Інтеграція з середовищем Node-RED додатково підсилює ці можливості завдяки візуальній розробці логіки реагування та взаємодії пристроїв.

Розробимо програмний алгоритм роботи системи обігріву/вентиляції теплиці для Raspberry Pi, а також блок-схему логіки роботи. Цей алгоритм враховує температуру повітря, рівень освітленості, стан напруги живлення та можливість аварійного або ручного керування. Блок-схема логічного функціоналу програми показана на рис.4.

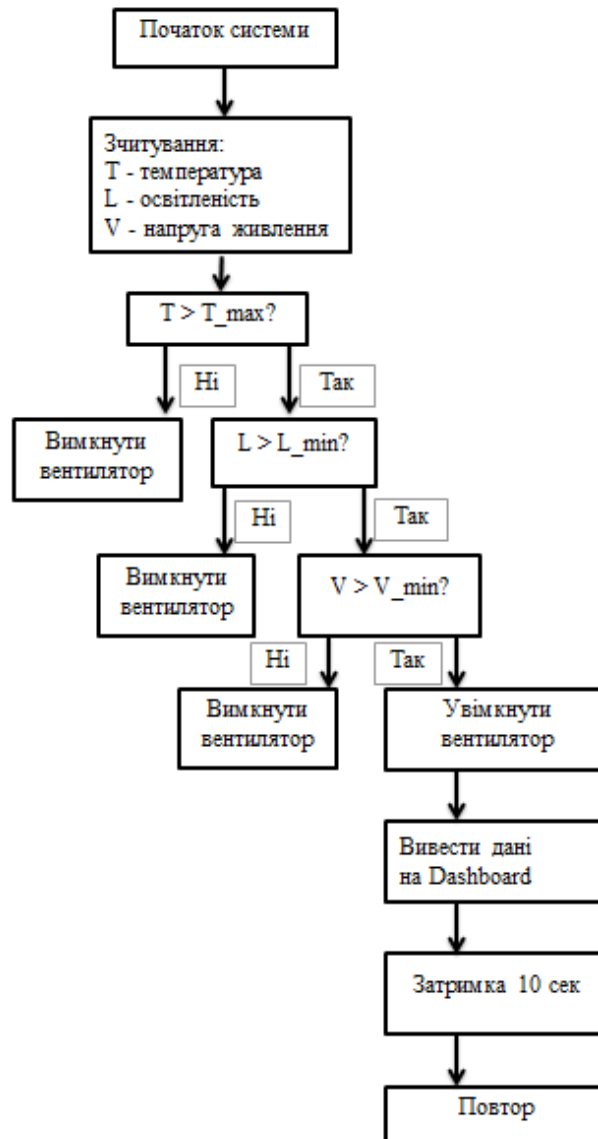


Рис.4. Блок-схема логічного функціоналу програми

Основні етапи алгоритму.

1. Початок.

На даному етапі відбувається запуск Raspberry Pi, автозавантаження Node-RED, ініціалізація датчиків DHT22 або BME280 (температура, вологість) та датчиків освітленості BH1750 або LDR та напруги живлення.

2. Зчитування даних. Здійснюється зчитування температури T (в $^{\circ}\text{C}$), освітленості L (в lx), напруги живлення V (в V).

3. Визначення умов запуску вентилятора. Якщо одночасно виконуються всі умови: $T > T_{\text{max}}$ (наприклад, 30°C), $L > L_{\text{min}}$ (наприклад, 200 lx), $V > V_{\text{min}}$ (наприклад, 11,5 V), то вентилятор увімкнено (GPIO HIGH).

4. Визначення умов вимкнення вентилятора. Якщо виконується хоча б одна з умов: $T \leq T_{\text{max}}$, $L \leq L_{\text{min}}$, $V \leq V_{\text{min}}$, то вентилятор вимкнено (GPIO LOW).

5. Режим енергозбереження. Якщо $V \leq V_{\text{critical}}$ (наприклад, 11,0 V): вимкнути всі навантаження, встановити статус «енергозбереження», надіслати повідомлення/сповіщення.

6. Візуалізація на дашборді. Вивести: температуру, освітленість, напругу, стан вентилятора, індикатори живлення та порогів, статус (автомат/економія/ручний).

7. Повторення циклу. Затримка ~5-10 секунд (залежно від потужності системи). Перейти до кроку 2.

Додаткові особливості логіки визначаються наступним чином. Ручний режим ініціалізується через Node-RED Dashboard. При цьому користувач може примусово вмикати/вимикати вентилятор незалежно від умов. Автоматичний режим активується за замовчуванням, а режим сповіщення опційно. Надсилання повідомлень у Telegram відбувається при вході в режим енергозбереження.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В статті розроблено енергоощадну систему обігріву та вентиляції теплиці, яка функціонує автономно на базі сонячного живлення, використовуючи монокристалічну сонячну панель. Це дозволяє забезпечити безперебійну роботу у віддалених умовах без підключення до централізованої енергомережі.

Застосування платформи Node-RED для логіки керування дозволило реалізувати гнучку систему автоматизації, яка реагує на зміну температури та освітленості в реальному часі, забезпечуючи адаптивне керування мікрокліматом теплиці. Температурне регулювання вентиляції реалізоване згідно з визначеним алгоритмом: при перевищенні температурою порогового значення (30 °C) вентилятор автоматично активується, при зниженні температури до або нижче порогу – вимикається. Такий підхід забезпечує оптимальні умови вирощування рослин і мінімізує втрати енергії. Рівень освітленості використовується як індикатор фотогенерації, що дозволяє оцінювати поточну здатність системи до автономної роботи. Це створює передумови для майбутньої реалізації більш складної логіки пріоритезації навантажень залежно від доступної енергії.

Експериментальна перевірка прототипу показала, що система здатна ефективно підтримувати потрібний мікроклімат у теплиці при мінімальному споживанні енергії, забезпечуючи стабільну роботу протягом світлового дня та з урахуванням поточного стану акумуляторного живлення. Інтеграція сенсорів (температури, освітленості) з Node-RED дозволяє легко масштабувати систему для інших потреб теплиці, таких як обігрів, зрошення або контроль вологості, без необхідності суттєвого втручання у фізичну конфігурацію пристроїв. Запропонована система є прикладом сталого аграрного рішення, яке поєднує сучасні IoT-технології, альтернативну енергетику та енергоефективне управління, що має перспективу для застосування в умовах обмежених енергоресурсів, зокрема в малих фермерських господарствах. Тому в даній статті здійснили розробку ефективної системи управління мікрокліматом, що є важливим завданням. Це забезпечить необхідний рівень температури, вологості та освітлення для рослин протягом року, покращить врожайність та якість продукції, а також знизить витрати енергії. Таким чином, робота має велике значення для практичної сфери та може суттєво вплинути на розвиток сільськогосподарського виробництва.

Список бібліографічного опису:

1. Abdellatif Soussi, Enrico Zero, Roberto Sacile, Daniele Trincherio. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. MDPI Sensors. April 2024, Vol.24(8):2647. DOI:10.3390/s24082647.
2. Liu, J.; Xiang, J.; Jin, Y.; Liu, R.; Yan, J.; Wang, L. Boost Precision Agriculture with Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Edge Intelligence: A Survey. Remote Sens. 2021, Vol.13, p.4387.
3. Lee, G.; Wei, Q.; Zhu, Y. Emerging Wearable Sensors for Plant Health Monitoring. Adv. Funct. Mater. 2021,31, 2106475.
4. Sharma, R.P.; Dharavath, R.; Edla, D.R. IoT-FIS: Internet of Farm Things Based Prediction for Crop Pest Infestation Using Optimized Fuzzy Inference System. Internet Things 2023, Vol.21, 100658.
5. Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.; Bogaardt, M.-J. Big Data in Smart Farming—A Review. Agric. Syst. 2017, Vol.153, pp.69–80.
6. Segarra, J.; Buchailot, M.L.; Araus, J.L.; Kefauver, S.C. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. Agronomy 2020, Vol.10, p. 641.
7. Koubaa, A.; Aldawood, A.; Saeed, B.; Hadid, A.; Ahmed, M.; Saad, A.; Alkhouja, H.; Ammar, A.; Alkanhal, M. Smart Palm: An IoT Framework for Red Palm Weevil Early Detection. Agronomy 2020, Vol. 10, p.987.
8. Huang, Y.; Huang, Y.; Gao, M.; Tian, S.; Xie, S. Wearable Plant Sensors Based on Nanometer-Thick Ag Films on Polyethylene Glycol Terephthalate Substrates for Real-Time Monitoring of Plant Growth. ACS Appl. Nano Mater. 2023, Vol.6, pp. 19010–19017.
9. Bersani, C.; Ruggiero, C.; Sacile, R.; Soussi, A.; Zero, E. Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of SmartGreenhouses in Industry 4.0. Energies 2022,15, p. 3834.
10. Kendall, H.; Clark, B.; Li, W.; Jin, S.; Jones, G.D.; Chen, J.; Taylor, J.; Li, Z.; Frewer, L.J. Precision Agriculture Technology Adoption: A Qualitative Study of Small-Scale Commercial “Family Farms” Located in the North China Plain. Precis. Agric. 2022, Vol.23, pp.319–351.
11. Karunathilake, E.M.B.M.; Le, A.T.; Heo, S.; Chung, Y.S.; Mansoor, S. The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. Agriculture 2023, Vol.13, p. 1593.

References:

1. Abdellatif Soussi, Enrico Zero, Roberto Sacile, Daniele Trincherio. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. MDPI Sensors. April 2024, Vol.24(8):2647. DOI:10.3390/s24082647.

2. Liu, J.; Xiang, J.; Jin, Y.; Liu, R.; Yan, J.; Wang, L. Boost Precision Agriculture with Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing and Edge Intelligence: A Survey. *Remote Sens.* 2021, Vol.13, p.4387.
3. Lee, G.; Wei, Q.; Zhu, Y. Emerging Wearable Sensors for Plant Health Monitoring. *Adv. Funct. Mater.* 2021,31, 2106475.
4. Sharma, R.P.; Dharavath, R.; Edla, D.R. IoFT-FIS: Internet of Farm Things Based Prediction for Crop Pest Infestation Using Optimized Fuzzy Inference System. *Internet Things* 2023, Vol.21, 100658.
5. Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.; Bogaardt, M.-J. Big Data in Smart Farming—A Review. *Agric. Syst.* 2017, Vol.153, pp.69–80.
6. Segarra, J.; Buchailot, M.L.; Araus, J.L.; Kefauver, S.C. Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. *Agronomy* 2020, Vol.10, p. 641.
7. Koubaa, A.; Aldawood, A.; Saeed, B.; Hadid, A.; Ahmed, M.; Saad, A.; Alkhoulja, H.; Ammar, A.; Alkanhal, M. Smart Palm: An IoT Framework for Red Palm Weevil Early Detection. *Agronomy* 2020, Vol. 10, p.987.
8. Huang, Y.; Huang, Y.; Gao, M.; Tian, S.; Xie, S. Wearable Plant Sensors Based on Nanometer-Thick Ag Films on Polyethylene Glycol Terephthalate Substrates for Real-Time Monitoring of Plant Growth. *ACS Appl. Nano Mater.* 2023, Vol.6, pp. 19010–19017.
9. Bersani, C.; Ruggiero, C.; Sacile, R.; Soussi, A.; Zero, E. Internet of Things Approaches for Monitoring and Control of SmartGreenhouses in Industry 4.0. *Energies* 2022,15, p. 3834.
10. Kendall, H.; Clark, B.; Li, W.; Jin, S.; Jones, G.D.; Chen, J.; Taylor, J.; Li, Z.; Frewer, L.J. Precision Agriculture Technology Adoption: A Qualitative Study of Small-Scale Commercial “Family Farms” Located in the North China Plain. *Precis. Agric.* 2022, Vol.23, pp.319–351.
11. Karunathilake, E.M.B.M.; Le, A.T.; Heo, S.; Chung, Y.S.; Mansoor, S. The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture* 2023, Vol.13, p. 1593.