

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-64-06>

УДК 004.72

Багнюк Наталія Володимирівна¹, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-7120-5455>

Лавренчук Світлана Василівна¹, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-5453-3924>

Мельник Василь Михайлович² к. ф-м. н, доцент

<http://orcid.org/0000-0001-8282-6639>

Бортник Катерина Яківна¹, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0001-5282-099X>

Овдієвич Богдан Юрійович¹, магістрант

¹Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

²Волинський фаховий коледж Національного університету харчових технологій, Луцьк, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІОТ-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ОСВІТЛЕННЯМ РАНИХ САДЖАНЦІВ

Багнюк Н. В., Лавренчук С. В., Мельник В. М., Бортник К. Я., Овдієвич Б. Ю. Дослідження ефективності ІоТ-системи моніторингу та керування освітленням раних саджанців. У статті представлено розроблення та експериментальне дослідження інтелектуальної ІоТ-системи автоматизованого моніторингу та адаптивного керування освітленням під час вирощування раних саджанців. Запропонована система побудована на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, цифрового температурного датчика DS18B20, релейного модуля керування світлодіодними фітолампами та вебінтерфейсу моніторингу, реалізованого за допомогою Node-RED Dashboard. Система забезпечує безперервний контроль температури, передавання даних до вебінтерфейсу та автоматичне керування освітленням відповідно до заданого розкладу або команд користувача. Експериментальні дослідження підтвердили стабільну роботу апаратно-програмного комплексу, високу точність моніторингу температури та ефективність дистанційного керування освітленням. Запропоноване рішення є масштабованою платформою для інтелектуального вирощування рослин у домашніх умовах і може бути розширене шляхом інтеграції додаткових сенсорів та алгоритмів прогнозування.

Ключові слова: ІоТ, Інтернет речей, Raspberry Pi, автоматизація теплиці, вирощування саджанців, Node-RED, моніторинг температури, адаптивне освітлення, розумний дім, керування.

Bahniuk N., Lavrenchuk S., Melnyk V., Bortnyk K., Ovdievich B. Research on the Effectiveness of an IoT-Based Monitoring and Control System for the Lighting of Early Seedlings. The article presents the development and experimental study of an intelligent IoT system for automated monitoring and adaptive lighting control during the cultivation of early seedlings. The proposed system is built on the basis of a Raspberry Pi single-board computer, a DS18B20 digital temperature sensor, a relay module for controlling LED phytolamps and a monitoring web interface implemented using Node-RED Dashboard. The system provides continuous temperature control, data transmission to the web interface and automatic lighting control according to a given schedule or user commands. Experimental studies have confirmed the stable operation of the hardware and software complex, high accuracy of temperature monitoring and the effectiveness of remote lighting control. The proposed solution is a scalable platform for intelligent plant cultivation at home and can be expanded by integrating additional sensors and forecasting algorithms.

Keywords: IoT, Internet of Things, Raspberry Pi, greenhouse automation, seedling cultivation, Node-RED, temperature monitoring, adaptive lighting, smart home, control.

Постановка наукової проблеми. Сучасний розвиток технологій Інтернету речей (ІоТ) сприяє активному впровадженню інтелектуальних систем у сільське господарство. Особливо актуальним є автоматизований контроль умов вирощування раних саджанців, оскільки на початкових етапах розвитку рослин навіть незначні відхилення температури або режиму освітлення можуть негативно впливати на їх ріст, розвиток та майбутню врожайність. Традиційні способи вирощування потребують постійного контролю з боку людини, що збільшує трудові витрати та не забезпечує своєчасного реагування на зміни параметрів навколишнього середовища. Використання сучасних ІоТ-технологій дозволяє автоматизувати процес збору інформації, аналізувати стан середовища в режимі реального часу та дистанційно керувати виконавчими пристроями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження у сфері автоматизованого вирощування рослин спрямовані на інтеграцію технологій Internet of Things, сенсорного моніторингу та автоматизованого керування параметрами середовища. Використання мережі сенсорів дає змогу здійснювати безперервний контроль температури, вологості, освітленості та інших параметрів, а отримані дані використовувати для формування керуючих впливів [1, 2]. В дослідженні значна увага приділяється застосуванню одноплатних комп'ютерів, зокрема Raspberry Pi, які забезпечують локальний збір, обробку та зберігання даних, а також взаємодію з виконавчими

пристроями. Показано доцільність використання Raspberry Pi для побудови систем дистанційного моніторингу та автоматичного керування тепличним середовищем [3]. Інтеграція бездротового зв'язку та вебінтерфейсів додатково забезпечує можливість віддаленого контролю стану системи та оперативного коригування режимів її роботи [4]. Перспективним напрямом є перехід від простого моніторингу до інтелектуального керування, за якого параметри середовища аналізуються в реальному часі та використовуються для автоматичного вибору режимів роботи обладнання. Дослідження показують ефективність поєднання IoT, алгоритмів аналізу даних і моделей прогнозування для підвищення стабільності умов вирощування та раціонального використання енергетичних ресурсів [5, 6]. Застосування алгоритмів машинного навчання та адаптивного керування дає можливість враховувати динаміку зміни параметрів середовища та формувати більш точні керуючі рішення [7]. Водночас сучасні системи орієнтуються на створення доступних і масштабованих платформ, здатних працювати з декількома типами сенсорів і забезпечувати локальне прийняття рішень [8]. Отже, аналіз сучасних розробок підтверджує доцільність створення системи автоматизованого контролю ранніх саджанців на базі Raspberry Pi, яка поєднує сенсорний моніторинг, автоматизоване керування освітленням, програмну обробку даних і вебмоніторинг.

Метою статті є розроблення та експериментальна перевірка інтелектуальної системи автоматизованого моніторингу та адаптивного керування освітленням ранніх саджанців на базі Raspberry Pi. Більшість бюджетних систем автоматизації базуються на мікроконтролерах Arduino або ESP32. Незважаючи на їх низьке енергоспоживання, такі платформи мають обмежені обчислювальні ресурси для реалізації вебсерверів, збереження історії вимірювань, візуалізації даних та використання алгоритмів інтелектуального аналізу. У зв'язку з цим у роботі запропоновано використання Raspberry Pi як центрального керуючого вузла, що поєднує функції збору даних, їх обробки, вебмоніторингу та керування обладнанням.

Виклад основного матеріалу дослідження

Запропонована система складається з чотирьох взаємопов'язаних підсистем: підсистеми збору даних, підсистеми обробки інформації, підсистеми керування освітленням, підсистеми дистанційного моніторингу. Для вимірювання температури використовується цифровий датчик DS18B20, підключений до Raspberry Pi через інтерфейс 1-Wire. Отримані дані періодично зчитуються, аналізуються та передаються до вебінтерфейсу.

Керування освітленням реалізовано за допомогою релейного модуля, який підключений до GPIO-портів Raspberry Pi. Вмикання та вимикання світлодіодних ламп здійснюється автоматично відповідно до встановленого графіка або вручну через вебінтерфейс. Архітектура інтелектуальної IoT-системи для автоматизованого вирощування ранніх саджанців показана на рисунку 1.

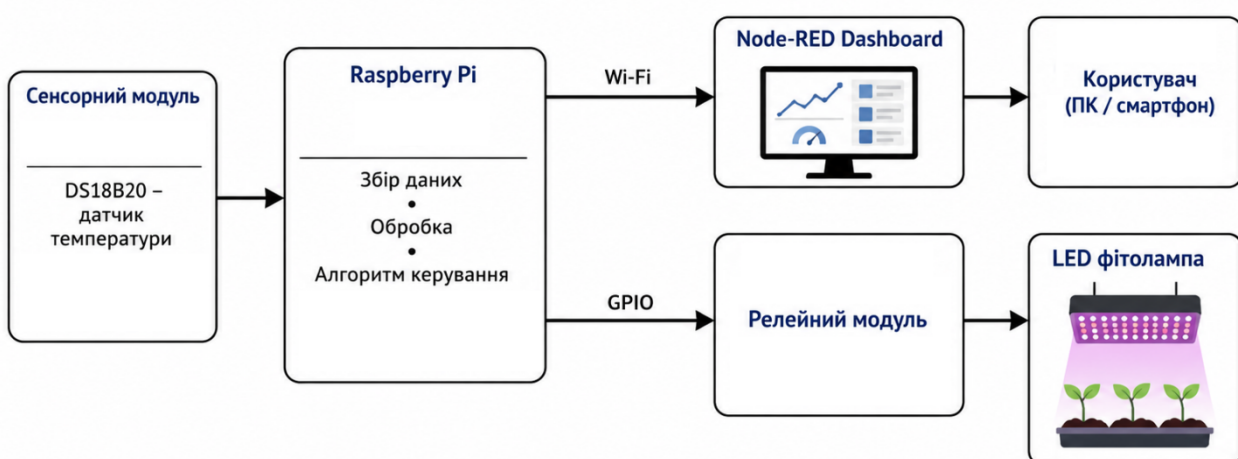


Рис. 1. Архітектура інтелектуальної IoT-системи для автоматизованого вирощування ранніх саджанців

Передавання інформації між системою та користувачем здійснюється локальною мережею Wi-Fi за допомогою Node-RED Dashboard, що забезпечує зручний дистанційний контроль роботи установки.

Програмна архітектура інтелектуальної системи автоматизованого контролю вирощування ранніх саджанців побудована на основі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi, який виконує функції центрального вузла збору, обробки та збереження даних, а також керування виконавчими пристроями. Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рисунку 1, а апаратної платформи Raspberry Pi – на рисунку 2.

Основою програмного забезпечення є операційна система Raspberry Pi OS, що забезпечує підтримку багатозадачності, мережесервісів та взаємодію з периферійними пристроями через інтерфейс GPIO. Розроблене програмне забезпечення реалізоване мовою Python, що дозволяє використовувати широкий набір бібліотек для роботи з датчиками, обробки даних та автоматизації процесів керування.

Програмна архітектура складається з декількох взаємодіючих модулів. Це є модуль збору даних, який кожні 30 секунд виконує опитування температурного датчика DS18B20 та перевіряє коректність отриманих значень. Модуль обробки аналізує виміряну температуру, формує історію спостережень та передає результати до вебінтерфейсу. Модуль керування освітленням підтримує два режими роботи – ручний та автоматичний.

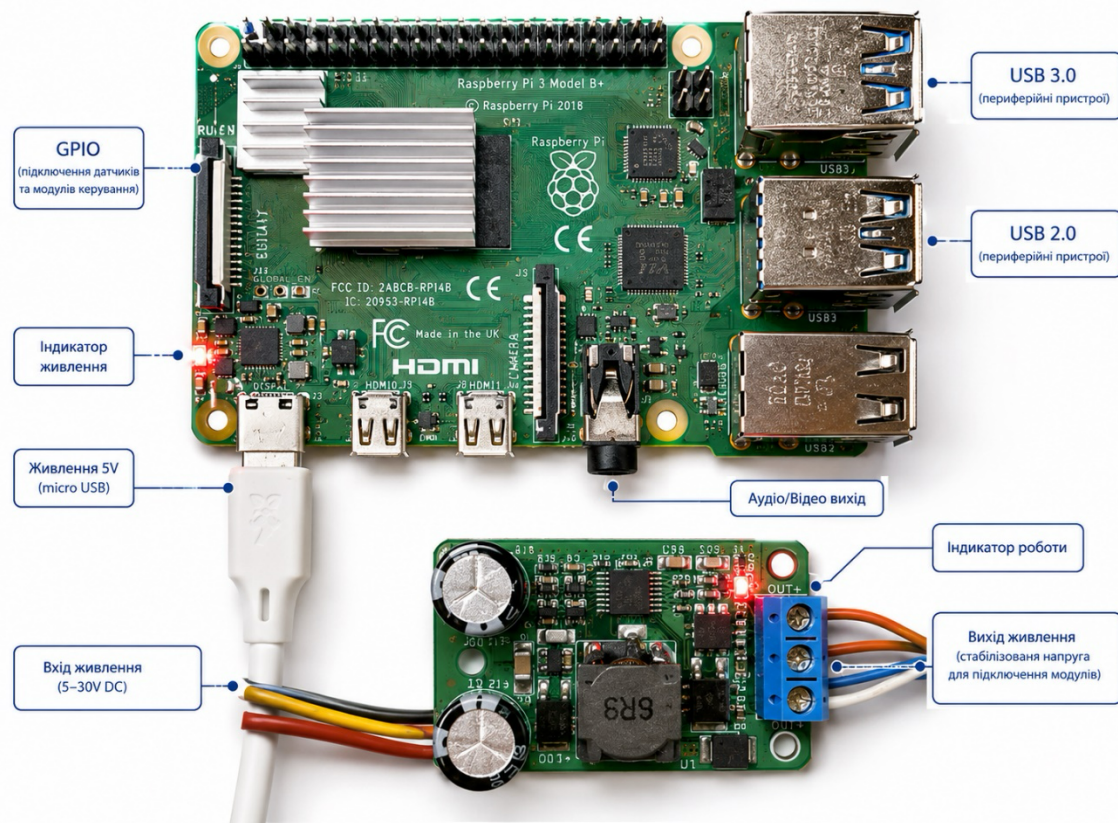


Рис. 2. Апаратна платформа

У ручному режимі користувач самостійно керує станом освітлення за допомогою перемикача вебінтерфейсу. В автоматичному режимі користувач задає час увімкнення та вимкнення ламп. Додатково реалізовано алгоритм адаптивного освітлення, який поступово зміщує момент увімкнення освітлення, моделюючи зміну тривалості світлового дня відповідно до сезонних умов. Вебінтерфейс реалізовано за допомогою Node-RED Dashboard та містить індикатор поточної температури, відображення стану ламп, вибір режиму роботи, налаштування часу увімкнення та вимкнення, елементи ручного керування.

Для експериментальної перевірки працездатності розробленої інтелектуальної системи автоматизованого контролю вирощування ранніх саджанців спроектовано та виготовлено

лабораторну установку, загальний вигляд якої наведено на рисунку 3. Експериментальна установка включала одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, температурний датчик DS18B20, релейний модуль, світлодіодні фітолампи, контейнер із саджанцями, Wi-Fi маршрутизатор, вебінтерфейс Node-RED Dashboard.

Конструкція установки розроблялася з урахуванням можливості моделювання реальних умов вирощування рослин у домашніх умовах, забезпечення стабільного мікроклімату, простоти модернізації та інтеграції з програмно-апаратним комплексом на базі Raspberry Pi. Основою установки є жорсткий каркас, виготовлений із плит OSB, який виконує функцію несучої конструкції для кріплення освітлювальних приладів. Таке конструктивне рішення забезпечує достатню механічну міцність, простоту виготовлення та можливість швидкої зміни висоти або положення джерел освітлення залежно від стадії розвитку рослин.

Робоча зона установки представлена пластиковим контейнером із ґрунтовим субстратом, у якому вирощуються ранні саджанці. Розміри контейнера дозволяють одночасно проводити експериментальні дослідження на групі рослин в однакових умовах.



Рис. 3. Експериментальна установка

Освітлення реалізовано за допомогою двох світлодіодних ламп різного спектрального складу. Основна світлодіодна лампа забезпечує біле освітлення, необхідне для фотосинтетичної активності рослин, тоді як додаткове джерело світла з фіолетовим спектром використовується для компенсації нестачі природного освітлення та стимулювання ростових процесів. Використання декількох джерел світла дозволяє досліджувати різні режими освітлення та забезпечує більш рівномірний розподіл світлового потоку по всій площі вирощування.

Під час експерименту температура вимірювалася безперервно в умовах реального вирощування рослин. Для оцінювання точності роботи системи покази цифрового датчика порівнювалися з показами еталонного цифрового термометра. Додатково досліджувалася робота системи у двох режимах керування освітленням: ручному та автоматичному. Для безперервного контролю температурного режиму у центральній частині контейнера встановлено цифровий температурний сенсор DS18B20. Таке розташування забезпечує вимірювання температури безпосередньо у зоні росту рослин та мінімізує вплив локальних температурних відхилень, які можуть виникати поблизу освітлювальних приладів. Дані із сенсора передаються до Raspberry Pi, де здійснюється їх подальша програмна обробка та аналіз. Центральним елементом системи є одноплатний комп'ютер Raspberry Pi, який виконує функції збору інформації від сенсорів, реалізації алгоритмів керування, формування команд для виконавчих пристроїв та забезпечення взаємодії з вебінтерфейсом користувача. Для комутації мережевого навантаження використовується релейний

модуль, який здійснює автоматичне ввімкнення та вимкнення освітлення відповідно до програмного алгоритму або команд оператора.

Живлення системи здійснюється через блок живлення постійного струму та перетворювач напруги, що забезпечують стабільне електроживлення Raspberry Pi та допоміжних електронних модулів. Така схема живлення дозволяє відокремити низьковольтну частину системи від мережевого навантаження освітлення, підвищуючи надійність та електробезпеку експериментальної установки. Під час проектування особлива увага приділялася можливості дистанційного моніторингу (рис.4). Raspberry Pi підключено до локальної мережі Wi-Fi, що забезпечує передавання інформації до вебінтерфейсу Node-RED Dashboard. Це дозволяє оператору в режимі реального часу контролювати температуру, змінювати режими роботи системи освітлення, задавати часові параметри її функціонування та спостерігати за поточним станом виконавчих пристроїв з персонального комп'ютера або мобільного телефону.



Рис. 4. Експериментальні дослідження. Стадія 1

Конструкція експериментальної установки має модульний принцип побудови. Це дозволяє без зміни базової архітектури інтегрувати додаткові сенсори вологості повітря, вологості ґрунту, освітленості або концентрації вуглекислого газу, а також підключати нові виконавчі пристрої, зокрема вентилятори, системи автоматичного поливу чи додаткові модулі штучного освітлення. Такий підхід забезпечує масштабованість розробленої системи та створює передумови для її подальшого розвитку. Таким чином, спроектована експериментальна установка поєднує механічну конструкцію, електронні компоненти та програмне забезпечення в єдиний кіберфізичний комплекс, що забезпечує автоматизований контроль параметрів мікроклімату, дистанційний моніторинг і керування процесом вирощування ранніх саджанців. Використана конструкція є достатньо простою для практичної реалізації, проте повністю відповідає вимогам проведення експериментальних досліджень та перевірки ефективності запропонованої інтелектуальної системи.

Отже, експериментальні дослідження проводилися з метою оцінювання ефективності функціонування розробленої інтелектуальної системи автоматизованого контролю вирощування ранніх саджанців. Дослідження виконувалися на експериментальній установці, побудованій на базі Raspberry Pi, цифрового датчика температури DS18B20, модуля релейного керування та світлодіодних фітоламп. Об'єктом дослідження були саджанці огірка, вирощені в однакових умовах. Після висівання насіння система працювала в автоматичному режимі. Програмне забезпечення підтримувало встановлений режим освітлення відповідно до заданого графіка,

здійснювало безперервний контроль температури та передавало результати вимірювань до вебінтерфейсу.

Експеримент тривав 14 діб і складався з двох послідовних етапів:

– етап 1 (3 доба) – аналіз проростання насіння та появи перших сходів (рис. 4);

– етап 2 (14 доба) – оцінювання розвитку рослин після тривалого функціонування автоматизованої системи (рис. 5).

Експеримент 1– оцінка розвитку рослин. На кожному етапі оцінювалися: середня висота рослин, кількість сформованих листків, зовнішній стан рослин, рівномірність розвитку, стабільність температурного режиму.



Рис. 5. Експериментальні дослідження. Стадія 2

На першому етапі експерименту (рис. 4) більшість насіння успішно проросла. Саджанці перебували у фазі сім'ядольних листків. Середня висота рослин становила $2,8 \pm 0,5$ см. Листкова поверхня була мінімальною, а стебла – тонкими, що відповідає ранній фазі розвитку.

Після безперервної роботи системи протягом 14 діб проведено повторне дослідження (рис. 5). На цьому етапі всі рослини перейшли до стадії активного вегетативного розвитку. Середня висота збільшилася до $8,9 \pm 0,8$ см, сформувалися 2-3 справжні листки, стебла стали міцнішими, а листки набули насиченого зеленого кольору. Візуально не спостерігалось ознак пригнічення росту або пожовтіння. Протягом експерименту температура підтримувалася в межах $19-21$ °С, що відповідало оптимальним умовам вирощування ранніх саджанців. Відхилення температури не перевищували $\pm 0,5$ °С, що свідчить про стабільність роботи системи керування.

Таблиця 1 – Результати експериментального дослідження

Показник	Етап 1 (3 доба)	Етап 2 (14 доба)
Кількість рослин	18	18
Середня висота	$2,8 \pm 0,5$ см	$8,9 \pm 0,8$ см
Кількість листків	2 (сім'ядольні)	2-3 справжні
Колір листків	світло-зелений	насичено-зелений
Стан стебла	тонке	міцне
Вживаність	100 %	100 %

Експеримент 2 – стабільність підтримання температурного режиму. Другим етапом досліджень було оцінювання якості підтримання температури всередині експериментальної

установки. Пробний експеримент проводився наступним чином. Система автоматично реєструвала температуру кожні 30 секунд протягом доби. Під час роботи алгоритму середня температура становила 19,8 °С, максимальне значення – 20,6 °С, мінімальне – 19,1 °С. Загальна амплітуда коливань не перевищувала 1,5 °С, що свідчить про стабільне функціонування системи моніторингу. Метою основного експерименту є оцінити точність вимірювання температури цифровим датчиком DS18B20 шляхом порівняння з контрольним цифровим термометром. Методика наступна: датчик DS18B20 і контрольний термометр розміщували поруч у зоні вирощування. Вимірювання виконувалися кожні 60 хв протягом 12 годин. Для кожного вимірювання визначали абсолютну та відносну похибку. Результати показані на рисунках 6 та 7.

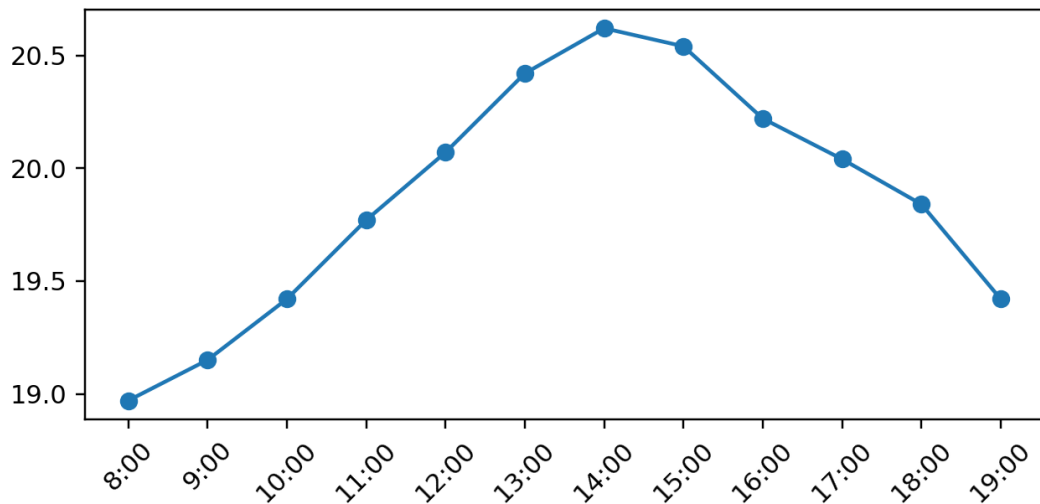


Рис. 6. Температура

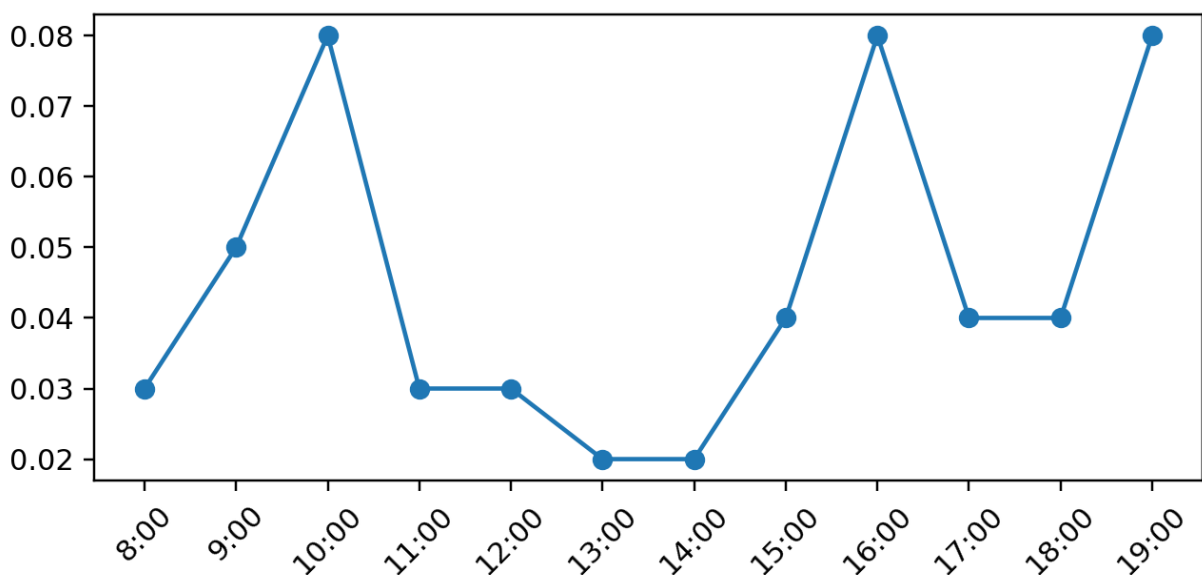


Рис. 7. Абсолютна похибка

Отримані результати демонструють незначну похибку вимірювання, що підтверджує придатність DS18B20 для моніторингу температури у системі автоматизованого вирощування саджанців. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що розроблена система забезпечує високу точність моніторингу температури у зоні вирощування ранніх саджанців. Порівняння показників цифрового сенсора DS18B20 із контрольним термометром показало практично повний збіг результатів вимірювання, а максимальна абсолютна похибка не

перевищувала 0,1 °C, тоді як відносна похибка залишалася меншою за 0,5 %. Програмно-апаратний комплекс на базі Raspberry Pi працював стабільно протягом усього експерименту, забезпечуючи безперервний збір, обробку та передачу інформації до вебінтерфейсу без втрати даних. Отримані результати підтверджують придатність розробленої системи для автоматизованого моніторингу мікроклімату та її ефективність як основи інтелектуальної системи керування процесом вирощування ранніх саджанців.

Аналіз отриманих результатів показує, що протягом усього експерименту система підтримувала температуру в оптимальному діапазоні 22-23 °C без значних коливань. Це забезпечило стабільні умови розвитку рослин та сприяло рівномірному росту саджанців (рис. 8).

Для кількісної оцінки ефективності вирощування було визначено відносний приріст висоти рослин. За результатами вимірювань середня висота саджанців збільшилася з 1,8 см до 15,8 см, що відповідає відносному приросту 777,8 %. Отримані результати узгоджуються з візуальними спостереженнями: на другому етапі експерименту саджанці мають сформовані листки, міцні стебла та рівномірний зелений колір, що свідчить про створення сприятливих умов вирощування автоматизованою системою.

Експеримент 3 – перевірка роботи алгоритму керування освітленням. Окремо було перевірено правильність функціонування алгоритму автоматичного керування освітленням.

Під час експерименту виконувалися такі режими:

- автоматичне увімкнення ламп у заданий час;
- автоматичне вимкнення після завершення циклу;
- ручне керування через вебінтерфейс;
- зміна часу роботи освітлення без перезавантаження системи.

У всіх випадках релейний модуль спрацював коректно, а зміна стану ламп відображалася у вебінтерфейсі практично миттєво (менше 1 с).

Температура підтримувалася системою автоматично в межах 22-23 °C, що є оптимальним для вирощування ранніх саджанців.

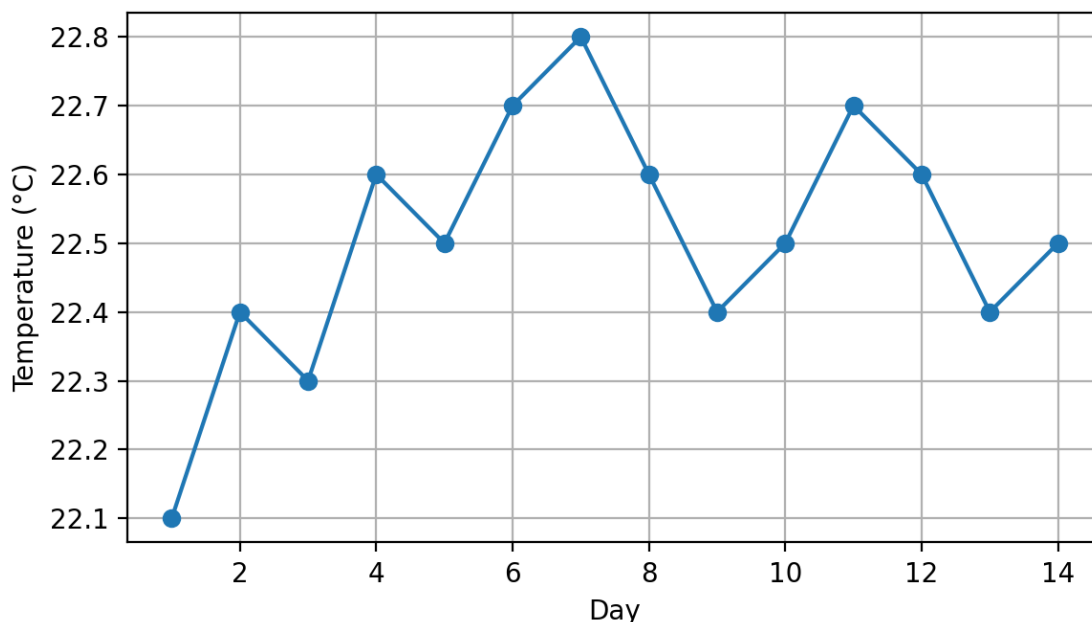


Рис. 8. Зміна температури повітря під час експерименту

Для оцінювання ефективності роботи системи використовувався показник відносного приросту висоти рослин $P = ((H_i - H_0) / H_0) \cdot 100\%$, де H_0 – середня висота саджанців на початку експерименту; H_i – середня висота на i -й день експерименту.

У проведеному дослідженні початкова середня висота становила 1,8 см, через 14 діб – 15,8 см. Таким чином, $P = ((15,8 - 1,8) / 1,8) \cdot 100\% = 777,8\%$ (рис. 9).

Отже, за період дослідження середня висота рослин збільшилася майже у 8,8 раза.

Проведені дослідження підтвердили ефективність розробленої системи автоматизованого контролю вирощування ранніх саджанців. Аналіз фотографій та вимірювань показав, що за 14 діб середня висота рослин збільшилася більш ніж утричі (з 2,8 см до 8,9 см), сформувалися справжні листки, а всі рослини зберегли життєздатність. Одночасно система забезпечувала стабільний температурний режим із мінімальними коливаннями та надійне автоматичне керування освітленням відповідно до заданого алгоритму. Сукупність отриманих результатів підтверджує доцільність використання Raspberry Pi як центрального контролера інтелектуальної системи вирощування ранніх саджанців.

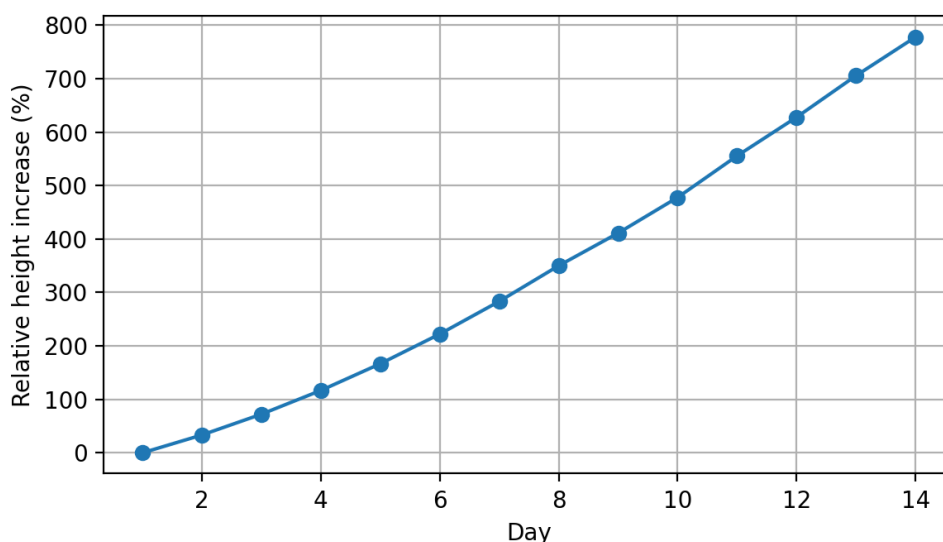


Рис. 9. Відносний приріст висоти саджанців

Температурний датчик забезпечував стабільне вимірювання температури протягом усього експерименту, а різниця між показами датчика DS18B20 та еталонного термометра залишалася в межах допустимої похибки. Розроблений вебінтерфейс забезпечував відображення поточної температури в режимі реального часу без помітних затримок. Релейний модуль коректно виконував комутацію освітлення як після команд користувача, так і відповідно до автоматично сформованого розкладу. Алгоритм адаптивного керування освітленням успішно реалізував поступове зміщення часу початку освітлення без порушення роботи системи.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. Порівняно з системами, побудованими виключно на мікроконтролерах Arduino або ESP32, використання Raspberry Pi забезпечує значно ширші функціональні можливості. Одноплатний комп'ютер одночасно виконує: збір інформації від сенсорів, локальну обробку даних, запуск веб-сервера, збереження історії вимірювань, візуалізацію параметрів у веб-інтерфейсі, можливість подальшого впровадження алгоритмів прогнозування та елементів штучного інтелекту. Хоча Raspberry Pi споживає більше електроенергії порівняно з типовими мікроконтролерами, його продуктивність дозволяє відмовитися від використання додаткових серверів або шлюзів, що спрощує архітектуру системи та забезпечує її масштабованість. Експериментальні дослідження підтвердили стабільну роботу апаратної та програмної частин системи, високу точність моніторингу температури, ефективність дистанційного керування освітленням і надійність реалізованого алгоритму автоматичного керування. Запропонована система може використовуватися як основа для створення інтелектуальних установок домашнього вирощування рослин та є перспективною платформою для подальшого розширення функціональних можливостей шляхом інтеграції датчиків вологості повітря, вологості ґрунту, освітленості, а також алгоритмів прогнозування параметрів мікроклімату на основі методів машинного навчання.

Список бібліографічного опису

1. Shamshiri R. R., Hameed I. A., Thorp K. R., et al. Greenhouse Automation Using Wireless Sensors and IoT Instruments Integrated with Artificial Intelligence. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97714.

2. Jiang R., Zhang D. Research and Development of Intelligent Greenhouse Monitoring and Control System: A Review. *Chemical Technology, Control and Management*, 2023. Vol.2023, Iss.3.
3. Remote-Control System for Greenhouse Based on Open Source Hardware. *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 52, No. 30. P. 178-183. DOI: 10.1016/j.ifacol.12.518.
4. Saud P. S., Chand A., Chaurasia N. K., et al. IoT Based Green House Monitoring and Controlling System. *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*. 2023. Vol. 5, No. 3. P. 207–221.
5. Eze V. H. U., Eze E. C., Alaneme G. U. Integrating IoT Sensors and Machine Learning for Sustainable Precision Agroecology: Enhancing Crop Resilience and Resource Efficiency Through Data-Driven Strategies, Challenges, and Future Prospects. *Discover Agriculture*. 2025.
6. Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management. 2025. 2025 Oct 3;25(19):6134. doi: 10.3390/s25196134
7. Cao X., Yao Y., Li L., et al. IGrow: A Smart Agriculture Solution to Autonomous Greenhouse Control. 2021. arXiv:2107.05464.
8. PyLoGreen: Design and Implementation of a Low-Cost Agricultural Data Acquisition and Monitoring System Using Raspberry Pi, LoRa, and nRF24L01 in the High-Andean Tundra. *HardwareX*. 2026. Vol. 26. e00766.

References

1. Shamshiri R. R., Hameed I. A., Thorp K. R., et al. Greenhouse Automation Using Wireless Sensors and IoT Instruments Integrated with Artificial Intelligence. *IntechOpen*, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.97714.
2. Jiang R., Zhang D. Research and Development of Intelligent Greenhouse Monitoring and Control System: A Review. *Chemical Technology, Control and Management*, 2023. Vol.2023, Iss.3.
3. Remote-Control System for Greenhouse Based on Open Source Hardware. *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 52, No. 30. P. 178-183. DOI: 10.1016/j.ifacol.12.518.
4. Saud P. S., Chand A., Chaurasia N. K., et al. IoT Based Green House Monitoring and Controlling System. *IRO Journal on Sustainable Wireless Systems*. 2023. Vol. 5, No. 3. P. 207–221.
5. Eze V. H. U., Eze E. C., Alaneme G. U. Integrating IoT Sensors and Machine Learning for Sustainable Precision Agroecology: Enhancing Crop Resilience and Resource Efficiency Through Data-Driven Strategies, Challenges, and Future Prospects. *Discover Agriculture*. 2025.
6. Multi-Sensor Monitoring, Intelligent Control, and Data Processing for Smart Greenhouse Environment Management. 2025. 2025 Oct 3;25(19):6134. doi: 10.3390/s25196134
7. Cao X., Yao Y., Li L., et al. IGrow: A Smart Agriculture Solution to Autonomous Greenhouse Control. 2021. arXiv:2107.05464.
8. PyLoGreen: Design and Implementation of a Low-Cost Agricultural Data Acquisition and Monitoring System Using Raspberry Pi, LoRa, and nRF24L01 in the High-Andean Tundra. *HardwareX*. 2026. Vol. 26. e00766.

Історія статті:

Отримано: 30.05.2026 Доопрацьовано: 20.08.2026 Прийнято до друку: 23.09.2026 Опубліковано: 29.09.2026