УДК 004.77:631.344.8 **DOI: 10.15330/itee.2026.4.08**

В.М. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, студент, В.І. МАНДЗЮК, док. фіз.-мат. наук

СПЕЦІАЛІЗОВАНА СИСТЕМА ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ТЕПЛИЦІ НА ОСНОВІ МІКРОКОНТРОЛЕРА ESP8266

Вступ

Застосування мікроконтролерних систем дистанційного моніторингу в тепличному господарстві набуває дедалі більшої актуальності, оскільки сприяє підвищенню ефективності керування, зменшенню витрат, покращенню якості продукції та пристосуванню до кліматичних змін [1]. Сучасний етап розвитку агропромислового комплексу характеризується активним впровадженням концепцій "Інтернету речей" (IoT). Такі системи здійснюють збір інформації з різноманітних давачів (температури, вологості, освітленості, рівня CO_2 тощо), що дає змогу оперативно регулювати мікроклімат у теплиці без необхідності постійного залучення фахівців. Автоматизація процесів дозволяє скоротити витрати на ручне керування, зокрема завдяки використанню автоматичних систем поливу та вентиляції, які забезпечують економію води й електроенергії [1, 2]. Вони забезпечують швидке реагування на кліматичні зміни, автоматично коригуючи параметри внутрішнього середовища теплиці. Такі системи можуть інтегруватися з технологіями IoT [2], хмарними платформами та аналітикою великих даних (Big Data).

Ефективне вирощування культур у закритому ґрунті (теплицях) критично залежить від суворого дотримання мікрокліматичних параметрів, таких як температура, вологість повітря, вологість ґрунту, концентрація газів та рівень освітленості [3]. Навіть незначні відхилення від оптимальних параметрів можуть призвести до зниження врожайності, захворювання рослин або перевитрати енергоресурсів.

Традиційні методи контролю мікроклімату часто є ручними або локальними, що обмежує оперативність реагування на аварійні ситуації (поломка обладнання, різкі температурні стрибки, критична концентрація CO_2) та вимагає постійної фізичної присутності фахівців. Сучасний етап автоматизації вимагає впровадження концепцій IoT для створення систем дистанційного моніторингу та керування.

Однак розробка таких систем стикається з низкою проблем:

- висока вартість промислових аналогів для малого та середнього бізнесу;
- складність масштабування та інтеграції з хмарними платформами аналітики великих даних;
- енергоефективність та автономність бездротових вузлів збору даних із різноманітних давачів.

Тому існує гостра потреба в розробці доступної, гнучкої та надійної системи дистанційного моніторингу параметрів теплиці, що і є завданням даної роботи. Використання мікроконтролерів сімейства ESP (наприклад, ESP8266 або ESP32) є перспективним шляхом вирішення цієї проблеми завдяки наявності вбудованих модулів Wi-Fi/Bluetooth, високій продуктивності, низькій вартості та можливості легкої інтеграції з IoT-платформами для передачі сповіщень про відхилення на мобільні пристрої користувачів [4-7].

Принципи функціонування систем дистанційного моніторингу параметрів теплиці

Функціонування дистанційних систем моніторингу параметрів теплиці базується на циклічному зборі первинної інформації за допомогою комплексу спеціалізованих давачів [8-10].

Температурні показники та вологість повітря контролюються цифровими сенсорами для запобігання перегріву рослин, тоді як стан субстрату оцінюється давачами вологості ґрунту для оптимізації графіків поливу. Оцінка рівня освітленості дозволяє керувати штучним освітленням, а давачі концентрації газів відстежують рівень вуглекислого газу, що є критично важливим для інтенсивності фотосинтезу.

Отримані від сенсорів електричні сигнали надходять на мікроконтролер через аналогові порти або цифрові інтерфейси зв'язку. Програмне забезпечення мікроконтролера здійснює первинну обробку даних, фільтрує випадкові завади та перераховує "сирі" показники (аналогову напругу чи цифровий код АЦП, опір чи струм, неформатовані пакети байтів) у загальноприйняті фізичні величини, такі як градуси Цельсія, відсотки, люкси та мільйонні частки. Це забезпечує точність і готовність інформації для її подальшого аналізу.

Завдяки інтегрованим бездротовим модулям мікроконтролера, опрацьовані дані транслюються в мережу Інтернет за допомогою локальних точок доступу. Для передачі пакетів інформації використовуються сучасні протоколи, зокрема MQTT або HTTP, які мінімізують навантаження на канал зв'язку та гарантують високу швидкість доставки повідомлень.

Інформаційні потоки акумулюються на спеціалізованих хмарних IoT-платформах або локальних серверах, де вони структуруються та зберігаються у базах даних. Це дозволяє здійснювати ретроспективний аналіз мікроклімату, будувати наочні графіки та забезпечувати віддалений доступ користувачів до поточної ситуації в теплиці через веб-інтерфейси або мобільні додатки з будь-якої точки світу.

Важливим принципом роботи системи є організація зворотного зв'язку та миттєвого реагування на позаштатні ситуації. Зафіксовані показники постійно порівнюються із заданими технологічними критеріями, і в разі виявлення критичних відхилень система автоматично генерує тривожні Push- або Telegram-сповіщення для персоналу, а також може ініціювати роботу виконавчих механізмів, як-от вентиляції чи обігріву.

Основні елементи пристрою та його реалізація

Основними компонентами розроблюваної системи є: давачі температури і вологості повітря, освітленості, газу та вологості ґрунту; мікроконтролерна плата ESP8266; GSM/GPRS модуль; сервер; база даних та засоби відображення (монітор, смартфон) (рис. 1).

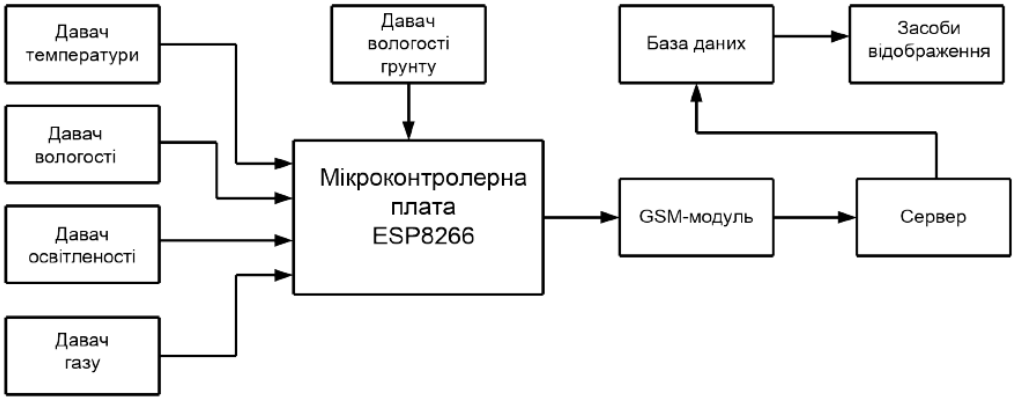


Рис. 1. Структурна схема системи моніторингу параметрів теплиці.

Сигнали від давачів (температури, освітленості, вологості повітря, газу, вологості ґрунту) поступають на аналого-цифровий перетворювач, який вбудований у мікроконтролерній платі ESP8266. Оцифрований сигнал надходить до мікроконтролера і через GSM/GPRS модуль передається до сервера. На сервері дані заносяться до бази даних та візуалізуються на моніторі (смартфоні) для користувача.

Для керування системою давачів обрано мікроконтролер ESP8266 з вбудованим Wi-Fi модулем, розроблений компанією Espressif Systems [11] (рис. 2). Даний мікроконтролер широко

використовується для автоматизації, збирання даних, дистанційного керування пристроями тощо.

Для вимірювання температури у спеціалізованій системі моніторингу параметрів теплиці вибрано цифровий давач температури та вологості DHT22 (рис. 3, а), який використовує ємнісний давач вологості та термістор для вимірювання навколишнього повітря та видає цифровий сигнал на контакт даних.

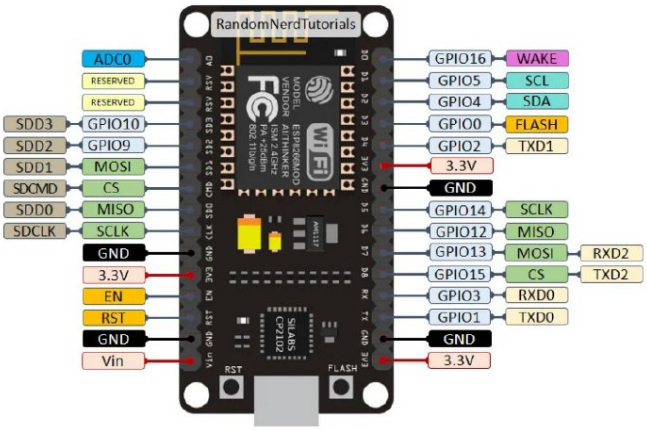


Рис. 2. Мікроконтролер ESP8266 у модулі 12-E NodeMCU.

Для вимірювання рівня освітленості вибрано давач TEMT6000 – кремнієвий n-p-n епітаксійно-планарний фототранзистор в мініатюрній прозорій формі для поверхневого монтажу на друкованій платі (рис. 3, б).

Для моніторингу якості повітря вибрано давач вимірювання газу MQ-135, який виявляє такі гази, як аміак, спирти, ароматичні сполуки, сульфіди, дим та інші токсичні гази (CO_2) (рис. 3, в).

Для вимірювання вологості ґрунту вибрано давач FC-28 (рис. 3, г). Цей давач використовує два зонди для пропускання струму через ґрунт, а потім зчитує опір ґрунту, щоб отримати значення рівня вологості.

Для передачі даних користувачу через мобільний інтернет у режимі реального часу вибрано GSM/GPRS модуль SIM800L (рис. 4), який працює на частотах GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz та PCS1900MHz. SIM800L має мультислотовий інтерфейс GPRS класу 12 / класу 10 (опціонально) і підтримує наступні кодові схеми GPRS: CS-1, CS-2, CS-3 та CS-4 [12].



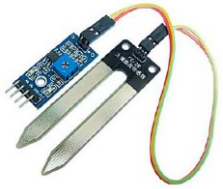
а)



б)



в)



г)

Рис. 3. Давач температури-вологості (а), освітленості (б), газу (в) та вологості ґрунту (г).



Рис. 4. Зовнішній вигляд GSM/GPRS модуля SIM800L.

Для систем керування базою даних обрано безкоштовний сервіс XAMPP [13] – дистрибутив Apache для запуску локального веб-сервера, який використовується для тестування взаємодії віддаленого сервера з мікроконтролером. Також XAMPP містить у собі СУБД MariaDB та утиліту phpMyAdmin для керування базою даних.

Електрична принципова схема пристрою (рис. 5) реалізована в онлайн-середовищі EasyEDA.

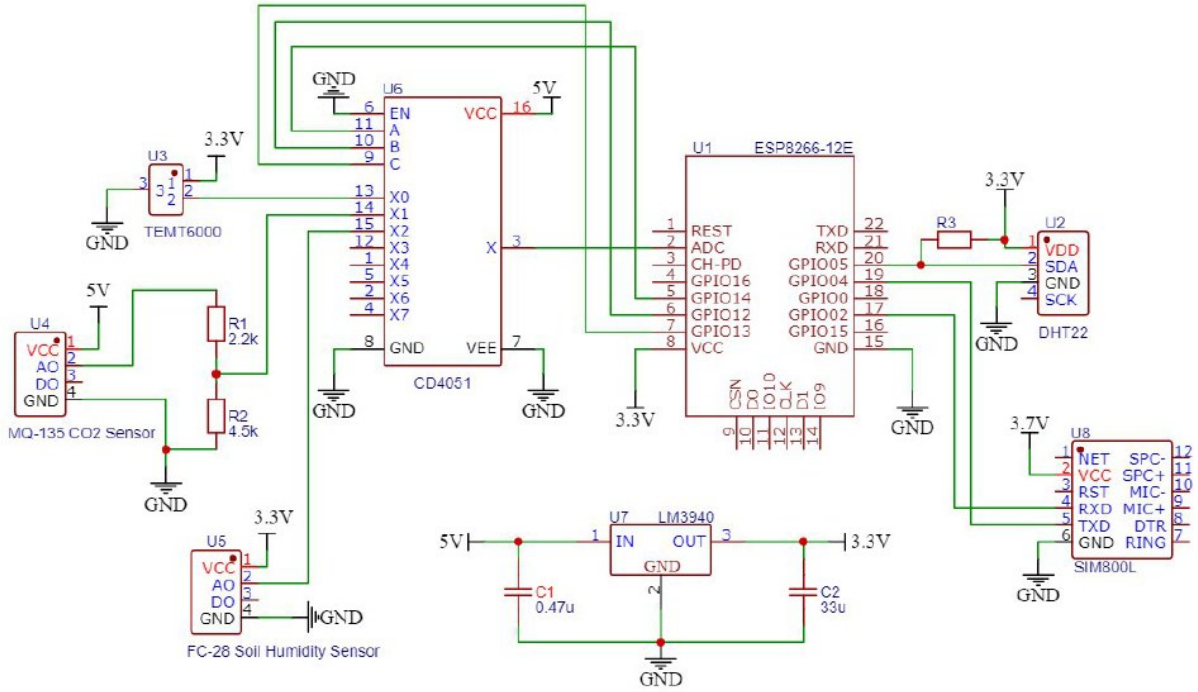


Рис. 5. Схема електрична принципова системи моніторингу параметрів теплиці.

Взаємодія між компонентами системи реалізована за такими основними напрямками.

Розширення аналогових входів (аналоговий мультиплексор)

Мікроконтролер ESP8266 (U1) має лише один аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – вивід ADC (пін 2). Для підключення трьох аналогових давачів у схему інтегровано 8-канальний аналоговий мультиплексор CD4051 (U6). Мікроконтролер керує вибором активного каналу мультиплексора за допомогою трьох цифрових ліній GPIO16, GPIO14 та GPIO12, які підключені до адресних входів A, B, C мікросхеми CD4051. Вихід мультиплексора X з'єднаний безпосередньо з єдиним АЦП-входом ESP8266. Це дозволяє почергово зчитувати дані з трьох аналогових сенсорів:

– давача освітленості TEMT6000 (U3);

– давача газу/вуглекислого газу MQ-135 (U4), підключеного через резистивний дільник напруги (R1, R2) для узгодження рівнів напруги 5 та 3,3 В;

– давача вологості ґрунту FC-28 (U5).

Зчитування цифрових давачів

Давач температури та вологості повітря DHT22 (U2) є цифровим пристроєм. Він підключений до мікроконтролера через послідовний однопровідний інтерфейс (лінія SDA з'єднана з портом GPIO05 ESP8266). Резистор R3 виконує роль підтягуючого (pull-up) до лінії живлення 3,3 В для забезпечення стабільності передачі цифрового сигналу.

Канал бездротового зв'язку та сповіщення (GSM-модем)

Для забезпечення автономного передавання даних у місцях, де відсутнє покриття Wi-Fi, у схему інтегровано стільниковий модуль SIM800L (U8). Взаємодія між ESP8266 та GSM-модемом відбувається за допомогою послідовного інтерфейсу UART через лінії TXD (GPIO15) та RXD (GPIO13). Цей модуль дозволяє системі відправляти SMS-сповіщення або передавати телеметрію через мобільний інтернет (GPRS) на хмарний сервер.

Система живлення пристрою

Стабільне функціонування схеми забезпечується лінійним регулятором напруги LM3940 (U7). Він знижує вхідну напругу 5 В (яка також живить давач газу MQ-135 та мультиплексор) до рівня 3,3 В, необхідного для живлення мікроконтролера ESP8266 та давача DHT22. Конденсатори C1 та C2 виконують роль фільтрів для згладжування високочастотних завад та стрибків напруги в лініях живлення. GSM/GPRS модуль SIM800L живиться від окремої літій-іонної батареї ICR18650 (на схемі не вказана), номінальна напруга якої складає 3,7 В і ємність – 2600 мА·год.

Представлений алгоритм функціонування системи розроблено з урахуванням вимог до енергоефективності та стабільності бездротового зв'язку в умовах автономної роботи теплиці (рис. 6). Логіка роботи програми розділена на два основні етапи: початкову конфігурацію та циклічний моніторинг.

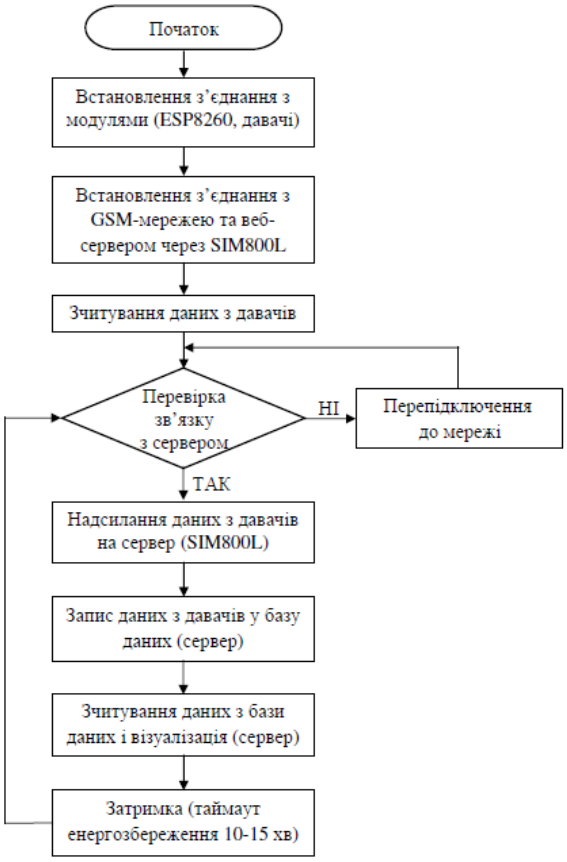


Рис. 6. Блок-схема алгоритму роботи системи.

На етапі ініціалізації, який виконується одноразово при подачі живлення на пристрій, відбувається конфігурація виводів мікроконтролера ESP8266, оголошення програмних об'єктів для роботи з давачами та запуск послідовного інтерфейсу UART для взаємодії з модемом SIM800L. Одразу після цього пристрій здійснює реєстрацію в мережі стільникового оператора та відкриває GPRS-сесію для встановлення базового з'єднання з веб-сервером. Таке архітектурне рішення дозволяє уникнути тривалих затримок на перепідключення під час подальшої роботи.

Основний робочий цикл системи починається з послідовного опитування давачів. Мікроконтролер зчитує цифрові показники температури та вологості, а потім, шляхом покрокової зміни логічних рівнів на адресних лініях мультиплексора CD4051, фіксує аналогові сигнали від давачів освітленості, концентрації газів та вологості ґрунту. Після первинної обробки та фільтрації даних програма виконує умовну перевірку активності мережевого з'єднання. Якщо зв'язок тимчасово втрачено, пристрій ініціює процедуру швидкого перепідключення. При стабільному з'єднанні сформований пакет телеметрії миттєво відправляється на віддалений сервер за допомогою модема.

Для оптимізації енергоспоживання та раціонального використання мобільного трафіку в кінці кожного циклу передбачено блок програмної затримки (таймауту). Протягом визначеного часу мікроконтролер може переходити в режим низького енергоспоживання, після чого алгоритм автоматично повертається до етапу зчитування датчиків, забезпечуючи безперервний і автономний моніторинг параметрів теплиці.

База даних розробленої системи складається з однієї таблиці і семи полів.

– id – порядковий номер запису; автоматично інкрементується при додаванні нового запису для забезпечення унікальності ідентифікатора;

– date_time – дата і час додавання запису у таблицю; автоматично визначається за часом сервера на момент додавання запису;

– temperature – поле для зберігання температури повітря в °C;

– humidity_air – поле для зберігання вологості повітря у %;

– light – поле для зберігання освітленості у лк;

– CO_2 – поле для зберігання концентрації вуглекислого газу у ppm;

– humidity_soil – поле для зберігання вологості ґрунту у %.

Для тестування коректності створеної бази даних виконується SQL-запит у SQL консолі phpMyAdmin, який додає запис із тестовими даними до таблиці (наприклад, INSERT INTO `greenhouse_parameters1`(`temperature`, `humidity_air`, `light`, `CO_2`, `O_2`, `humidity_soil`) VALUES (35.5, 80, 300, 3500, 4500, 90)).

На основі тестових даних із бази даних були побудовані графіки за допомогою скрипта index.php (рис. 7).



Рис. 7. Візуалізація тестових даних параметрів теплиці.

Серверна частина системи моніторингу параметрів теплиць складається з двох PHP скриптів:

– send_data.php – скрипт приймає значення параметрів з давачів та записує їх у базу даних;

– index.php – скрипт отримує параметри давачів з бази даних та візуалізує їх для користувача.

Інтефейс користувача складається з двох блоків:

- блок вводу – користувач вводить кількість останніх записів з бази даних, які він хоче відобразити на графіках;

- блок візуалізації – виводяться графіки з параметрами теплиці.

За результатами проведеного тестування параметрів теплиці, можна стверджувати, що дані отримуються з бази даних та візуалізуються коректно.

Висновки

У роботі розроблено систему дистанційного моніторингу параметрів теплиці на базі ESP8266, яка дозволяє здійснювати дистанційний збір, передачу, збереження та візуалізацію даних про основні параметри теплиці, зокрема температуру, вологість повітря, вологість ґрунту, освітленість та якість повітря. Система забезпечує оперативний контроль стану теплиці в реальному часі, зберігання отриманих даних у базі даних, а також зручний доступ користувача до інформації через веб-інтерфейс. Реалізовано програмне забезпечення, яке забезпечує збір, обробку, передачу та збереження даних із сенсорів мікроконтролерної системи. Розроблена система може бути використана у невеликих домашніх теплицях для контролю і забезпечення оптимальних умов вирощування і росту сільськогосподарських культур.

Список літератури:

1. D. Kovalchuk, “Smart greenhouse control model based on internet of things technology,” Connectivity, vol. 1, Art. no. 5, 2026. doi: https://doi.org/10.31673/2412-9070.2026.017406 .

2. O. I. Miskevych and I. S. Shulhach, “Methods and tools for developing a web interface for controlling Arduino hardware modules as part of the internet of things system,” (in Ukrainian), Komp’iuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo, no. 59, pp. 6–13, 2025. doi: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-31 .

3. A. A. Thasleema, L. Keerthi, S. C. Naik, H. Abhishek, M. Nagarjuna, and M. C. Bhanu Prasad, “Green house monitoring and control using iot project,” Int. J. Sci. Technol., vol. 16, no. 2, Art. no. 9, 2025. doi: https://doi.org/10.71097/IJSAT.v16.i2.3289 .

4. A. Charan, G. Ramarao, G. U. Kumar, J. F. Khan, and J. Riyaz, “Sensor-guided smart greenhouse system for optimized crop production using ESP32 microcontroller,” Int. J. Adv. Res., vol. 13, no. 1, pp. 7–14, 2025. doi: https://doi.org/10.21474/IJAR01/22209 .

5. J. J. Correa-Quiroz, M. A. Toribio-Barrueto, and C. Castro-Vargas, “IoT system with ESP32 for smart drip irrigation and climate monitoring in greenhouses,” Emerg. Sci. J., vol. 9, no. 3, Art. no. 25, 2025. doi: https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-03-01 .

6. N. Muhammad, M. M. S. Islam, and S. S. Swapno, “Smart greenhouse system for cultivating medicinal plants for patient care with IoT integration,” Int. J. Res. Innov. Soc. Sci., vol. 10, no. 1, Art. no. 9, 2026. doi: https://doi.org/10.47772/IJRISS.2026.10100307 .

7. N. A. Ostapyshyn and V. I. Mandzyuk, “Fire protection system based on the NODEMCU V3 ESP8266 module for domestic use,” (in Ukrainian), Inf. Technol. Electron. Eng., no. 2, pp. 7–13, Jun. 2025. doi: https://doi.org/10.15330/itee.2025.2.01 .

8. G. Karamanis, C. Drosos, M. Papoutsidakis, and D. Tseles, “Implementation of an automated system for controlling and monitoring a hydroponic greenhouse,” Int. J. Eng. Sci. Invent., vol. 7, no. 10, pp. 8–15, Oct. 2018.

9. F. E. Oguz, M. N. Ekersular, K. M. Sunnetci, and A. Alkan, “Enabling smart agriculture: an IoT-based framework for real-time monitoring and analysis of agricultural data,” Agric. Res., vol. 13, pp. 12–24, 2024. doi: https://doi.org/10.1007/s40003-024-00705-x .

10. B. M. Zerihun, T. O. Olwal, and M. R. Hassen, “Design and analysis of IoT-based modern agriculture monitoring system for real-time data collection,” in Computer Vision and Machine Learning in Agriculture (Algorithms for Intelligent Systems), M. S. Uddin and J. C. Bansal, Eds., Singapore: Springer, 2022, pp. 2–18. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-9991-7_5 .

11. “Мікроконтролер ESP8266,” (in Ukrainian), IT Master, 2024. [Online]. URL: https://itmaster.biz.ua/directory/microcontrollers/esp8266.html .

12. “SIM800L Hardware Design V1.00,” SIMCom Wireless Solutions, Datasheet, 2020. [Online]. URL: https://www.makerhero.com/img/files/download/Datasheet_SIM800L.pdf .
13. “XAMPP Apache + MariaDB + PHP + Perl,” Apache Friends, 2024. [Online]. URL: https://www.apachefriends.org

Надійшла до редколегії 17.05.2026;

Відомості про авторів:

Добровольський Василь Михайлович – магістр кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника/Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: vasyl.dobrovolskyi.20@pnu.edu.ua;

Мандзюк Володимир Ігорович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри комп’ютерної інженерії та електроніки, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника/Vasyl Stefanyk Carpathian National University, Україна; email: volodymyr.mandziuk@cnu.edu.ua; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6020-7722