

РОЗУМНИЙ КОНТРОЛЬ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО ПОЛИВУ РОСЛИН, КЕРОВАНОГО IoT

*Ілля Лазарук, студент, Галина Клим, д.т.н., професор
Національний університет "Львівська політехніка", Україна
e-mail: halyna.i.klym@lpnu.ua*

Анотація

У статті представлено процес розробки та дослідження IoT-системи автоматизованого поливу рослин, що ґрунтується на вимірюванні рівня вологості ґрунту. У якості головного модуля використано мікроконтролер ESP32 DevKit v1, який забезпечує бездротову передачу даних через Wi-Fi. До пристрою підключено цифрові сенсори температури та вологості повітря DHT11 та DS18B20, а також ємнісний сенсор вологості ґрунту. Для реалізації водопостачання застосовано помпу на 5 В із транзисторним керуванням. Збір і візуалізація даних відбувається за допомогою хмарної IoT-платформи ThingsBoard Cloud з використанням MQTT-протоколу. Програмне забезпечення розроблено у середовищі PlatformIO, інтегрованому з Visual Studio Code, що забезпечує сумісність із Arduino Framework. Система протестована в реальних умовах експлуатації: за результатами вимірювань точність сенсорів перебуває в межах допустимих похибок $\pm 5\%$, середній час ініціалізації пристрою становить близько 8 секунд, а передача телеметрії на платформу відбувається з інтервалом 30 секунд. Система показала стабільну роботу в умовах змін навколишнього середовища та має потенціал для застосування в розумних аграрних рішеннях.

Ключові слова

автоматизований полив, ESP32, ThingsBoard, DHT22, YL-69, MQTT, сенсори.

1. Вступ

В останні роки інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) в аграрну сферу набула особливої актуальності у зв'язку з підвищеним попитом на сталу та ефективну сільськогосподарську практику [1–3]. Однією з найбільш трансформаційних сфер застосування IoT є автоматизація систем зрошення, що використовують дані в реальному часі від сенсорів навколишнього середовища для оптимізації споживання води та підвищення врожайності культур [4,5]. Такий підхід відповідає концепції точного землеробства, спрямованого на мінімізацію витрат ресурсів за одночасного забезпечення оптимальних умов для росту рослин.

З огляду на зростаючу кліматичну варіативність та обмеженість прісноводних ресурсів, потреба в інтелектуальних рішеннях з управління водними ресурсами в аграрному секторі стає нагальною. Традиційні методи зрошення, засновані на фіксованих графіках або ручному управлінні, не здатні адаптуватися до змін погодних умов чи рівня вологості ґрунту, що часто призводить до надмірного або недостатнього поливу. Подібні неефективності не лише спричиняють перевитрату води, а й можуть негативно впливати на здоров'я рослин і якість врожаю.

Для вирішення цих проблем IoT-системи поєднують мережу сенсорів, мікроконтролерів і комунікаційних модулів, забезпечуючи автономний моніторинг та керування процесами поливу. Існуючі дослідження демонструють різноманітні стратегії впровадження — від систем моніторингу зрошення на основі GSM [6] до сенсорних мереж з використанням платформ Arduino [7], — які спрямовані на вдосконалення прийняття рішень та зменшення ручного втручання. Крім того, застосування легких протоколів зв'язку, таких як MQTT, а також хмарних дашбордів значно підвищило масштабованість систем, зручність для користувачів і аналітичну цінність зібраних даних [8–10].

Ці технологічні досягнення свідчать про ширший перехід аграрної галузі до орієнтованих на дані, адаптивних систем, які здатні динамічно реагувати на зміни в реальному часі. Впровадження таких рішень не лише сприяє збереженню водних ресурсів, але й підвищує стійкість та продуктивність агроecosистем в умовах екологічного та економічного тиску.

2. Постановка проблеми

Сільськогосподарський сектор зазнає зростаючого тиску щодо оптимізації використання ресурсів, особливо води, через посилення екологічних проблем, змін клімату та необхідність забезпечення продовольчої безпеки для зростаючого світового населення. Традиційні методи зрошення, що зазвичай ґрунтуються на фіксованих графіках або ручній оцінці стану полів, є неефективними за своєю природою та можуть призводити як до надмірного, так і до недостатнього поливу. Такі неефективності не лише марнують цінні водні ресурси, але й негативно впливають на здоров'я рослин, структуру ґрунту та загальну продуктивність сільського господарства [11,12].

Останні досягнення в галузі технологій Інтернету речей (IoT) відкривають нові можливості для подолання цих викликів завдяки моніторингу в реальному часі та автоматизованому керуванню процесами зрошення. IoT-системи поливу зазвичай включають різноманітні сенсори навколишнього середовища та виконавчі механізми для збору даних і реагування на зміну умов у полі. Однак, незважаючи на технологічний потенціал, практичне впровадження таких систем досі стикається з низкою суттєвих перешкод. Серед них висока вартість розгортання, неналежне калібрування сенсорів, обмежена зона покриття бездротового зв'язку в сільській місцевості, а також відсутність стандартизованих платформ для обробки та візуалізації даних [13,14]. Крім того, багато наявних досліджень зосереджені переважно на теоретичних моделях або лабораторних прототипах, які не проходили належної перевірки в реальних умовах сільського господарства. Як наслідок, існує розрив між інноваціями, що виникають у межах досліджень, і їх практичним, масштабним застосуванням на полях, особливо в умовах обмежених ресурсів або дрібного фермерства [15]. Також бракує досліджень, що надають комплексну оцінку продуктивності систем упродовж тривалого часу, зокрема щодо надійності передачі даних, точності сенсорів в умовах змінного середовища та загальної стійкості системи. Таким чином, існує критична потреба у створенні надійної, економічно ефективної та масштабованої IoT-системи зрошення, яка б поєднувала стабільні сенсорні мережі, ефективні протоколи зв'язку та хмарні платформи для управління даними. Така система має не лише автоматизувати полив на основі вологості ґрунту та параметрів навколишнього середовища, а й забезпечувати стабільну роботу в умовах реального сільськогосподарського середовища. Вирішення цієї проблеми сприятиме розвитку точного землеробства та підвищенню ефективності використання води, особливо в регіонах, які вразливі до посух і мають обмежений доступ до сучасної інфраструктури.

3. Мета

Головною метою цього дослідження є розробка та впровадження комплексної IoT-системи автоматизованого поливу рослин, яка використовує дані сенсорів вологості ґрунту, температури повітря та вологості повітря для точного та своєчасного запуску поливу, ефективного управління водними ресурсами та контролю клімату в зоні вирощування. Система призначена для автоматичного керування водяним насосом, обігрівачем та охолоджувачем на основі даних у реальному часі, забезпечуючи оптимальні умови для рослин із мінімальним втручанням користувача. Крім того, система інтегрується з хмарною IoT-платформою, що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг і керування, а також візуалізацію в реальному часі та налаштування параметрів через зручний інтерфейс користувача. Ця робота спрямована на створення економічно ефективного та гнучкого рішення, яке підтримує застосування розумного сільського господарства, поєднуючи автоматизацію на основі сенсорів із хмарним підключенням для покращеного доступу користувачів і адаптивності до навколишнього середовища.

4. Вибір засобів для реалізації системи

Для реалізації автоматизованої системи поливу, здатної контролювати параметри навколишнього середовища та забезпечувати віддалене керування, було ретельно обрано апаратні та програмні компоненти з метою забезпечення надійності, масштабованості та енергоефективності системи.

Ядром системи є мікроконтролер ESP32 DevKit v1, який обрано за його високу обчислювальну потужність, вбудовані модулі Wi-Fi і Bluetooth, а також достатню кількість цифрових та аналогових входів/виходів. Ці особливості дозволяють одночасно підключати кілька сенсорів і виконавчих пристроїв без необхідності додаткових модулів розширення. Крім того, ESP32 підтримує широкий спектр протоколів зв'язку, що є важливим для безшовної інтеграції з хмарними IoT-платформами.

Для збору даних про стан ґрунту та повітря було обрано сенсори з урахуванням їх точності, швидкодії та сумісності з мікроконтролером. Вологість ґрунту вимірюється сенсором YL-69, який формує аналоговий сигнал, що відповідає провідності ґрунту. Температура і вологість повітря контролюються датчиком DHT22, який забезпечує високу точність ($\pm 0,5$ °C для температури та ± 2 % для вологості) і передає дані у цифровому форматі, що спрощує інтеграцію та зменшує шум сигналу.

Керування виконавчими механізмами здійснюється через водяний насос на 5 В постійного струму, керований релейним модулем. Насос автоматично вмикається, коли рівень вологості ґрунту опускається нижче заданого порогу, забезпечуючи своєчасний полив без участі людини. У поточній експериментальній конфігурації функції обігріву та охолодження імітуються світлодіодами, які слугують індикаторами відповідних механізмів контролю клімату. Ці індикатори також керуються через реле, що імітує реальне увімкнення систем терморегуляції.

Для візуалізації даних у реальному часі та віддаленого доступу обрана хмарна платформа ThingsBoard Cloud, а не ThingSpeak. Вона надає інструменти для збору, зберігання та графічного відображення потоків даних, отриманих від мікроконтролера. Доступ до платформи можливий через веб-інтерфейс, що дозволяє користувачам моніторити систему з будь-якого пристрою з підключенням до інтернету. Передача даних від ESP32 до хмари здійснюється за протоколом MQTT, який нативно підтримується мікроконтролером і широко використовується в IoT-додатках.

Програмна частина системи була розроблена із застосуванням PlatformIO IDE, інтегрованого з редактором Visual Studio Code, та мови програмування C++. Це середовище розробки підтримує швидке прототипування,

зручне налагодження та безперешкодне завантаження прошивки на плату ESP32. Логіка обробки даних і керування пристроєм реалізована на основі правил прийняття рішень із пороговими значеннями, що дозволяють динамічно коригувати параметри роботи залежно від умов.

Вибір таких компонентів забезпечує надійну роботу системи в автономному режимі та гнучку адаптацію до різних типів рослин або кліматичних умов. Крім того, використання апаратного і програмного забезпечення з відкритим кодом полегшує подальше оновлення і інтеграцію в більш широкі системи розумного сільського господарства.

PlatformIO IDE має розширений функціонал, що суттєво спрощує розробку вбудованих систем, підтримує понад тисячу плат, включно з ESP32, Arduino, STM32, Raspberry Pi Pico та іншими, дозволяє працювати одночасно з кількома мікроконтролерами та забезпечує компіляцію для різних платформ без необхідності встановлення кількох середовищ розробки.

Платформа інтегрується з Visual Studio Code і забезпечує повну підтримку автодоповнення коду, підсвічування синтаксису, виявлення та виправлення помилок. Менеджер бібліотек PlatformIO полегшує пошук, встановлення та оновлення необхідних бібліотек, а всі залежності автоматично опрацьовуються під час компіляції проєкту.

Ініціалізація нового проєкту відбувається швидко із автоматичним створенням конфігураційного файлу platformio.ini, у якому вказуються параметри плати, фреймворку та бібліотек. Платформа підтримує різноманітні інструменти налагодження, зокрема GDB та OpenOCD, і має вбудований серійний монітор для моніторингу пристрою в реальному часі. Підтримується інтеграція з системами контролю версій, такими як Git. Крім того, платформа забезпечує можливості крос-компіляції та емуляції, підтримує різні фреймворки, зокрема Arduino і ESP-IDF, та юніт-тестування. Завдяки відкритій природі та великій спільноті користувачів платформа постійно вдосконалюється і має велику документацію, що сприяє швидкому опануванню інструменту.

У контексті реалізації системи автоматичного поливу ця платформа дозволяє легко інтегрувати бібліотеки для роботи з різними сенсорами, ефективно використовувати MQTT-протокол за допомогою бібліотеки PubSubClient, а також автоматизувати налаштування мікроконтролера ESP32 через конфігураційний файл.

5. Функціональна діаграма автоматизованої системи поливу рослин

На основі структурної діаграми, наведеної на рис. 1, було розроблено функціональну модель, яка ілюструє взаємодію між апаратними та програмними компонентами автоматизованої IoT-системи поливу рослин. Структурна діаграма надає комплексну візуалізацію архітектури системи, окреслюючи зв'язки між ключовими модулями та дозволяючи оцінити процес передачі сигналів і даних всередині системи.

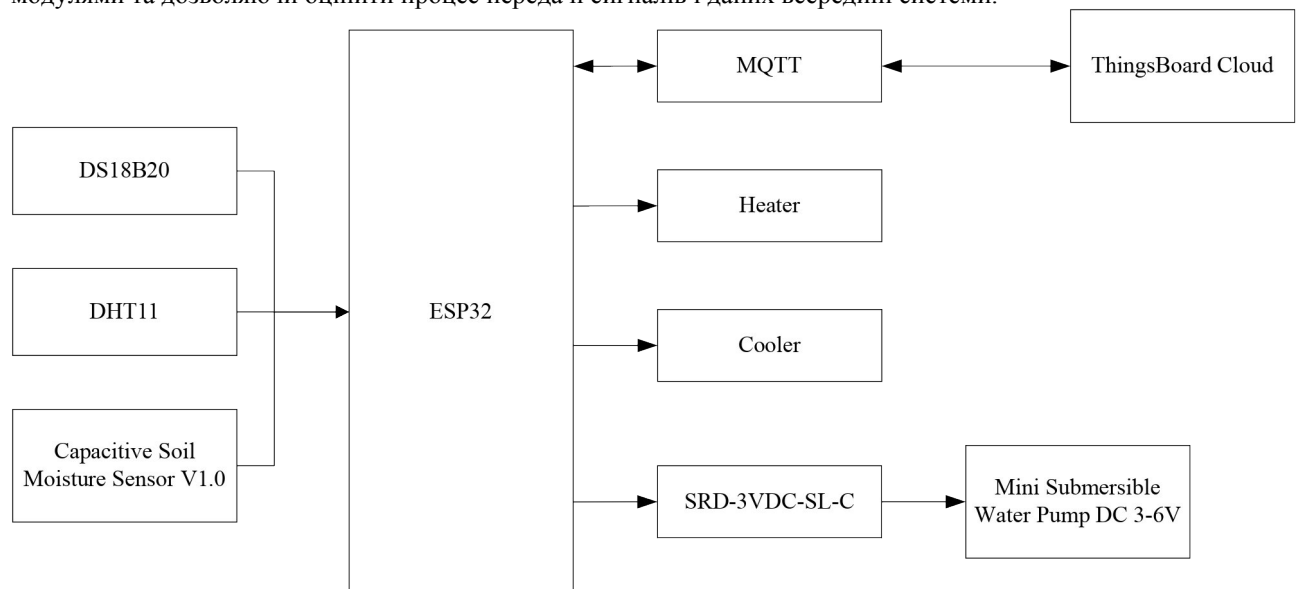


Рис. 1. Структурна схема IoT системи поливу

В основі системи лежить мікроконтролер ESP32 (WROOM-32), який виконує завдання збору, обробки та передачі даних, а також керує виконавчими пристроями. До мікроконтролера підключено сенсори: сенсор температури та вологості повітря DHT22 і сенсор вологості ґрунту YL-69. Кожен із цих сенсорів відповідає за моніторинг мікрокліматичних параметрів, які є критично важливими для прийняття рішень щодо поливу, обігріву або охолодження.

Значення, зібрані сенсорами, надходять на ESP32, де аналізуються відповідно до заздалегідь заданих порогових значень. Коли рівень вологості ґрунту опускається нижче визначеного порогу, активується релейний модуль, який, у свою чергу, вмикає міні-погружний водяний насос для початку поливу. У випадках різких коливань

температури мікроконтролер відправляє сигнали на модулі обігріву або охолодження, підтримуючи оптимальні умови для росту рослин.

Окрім локального керування, система передає дані на хмарну IoT-платформу ThingSpeak, яка забезпечує зручний інтерфейс для збору, візуалізації та аналізу даних. Через цю платформу користувачі можуть відстежувати історичні зміни параметрів, налаштовувати порогові значення та дистанційно моніторити роботу системи.

Ядром пристрою є сенсори, які збирають інформацію про вологість ґрунту та параметри повітря. Виконавчим пристроєм, що відповідає за полив, є насос. З технічної точки зору, роботу обігрівача та охолоджувача було вирішено імітувати за допомогою світлодіодів.

Для збирання пристрою було використано такі компоненти: мікроконтролер ESP32-Wroom-32, сенсор вологості ґрунту YL-69, датчик температури та вологості повітря DHT22, два RGB-світлодіоди KY-016, міні-погружний водяний насос DC 3-6V, релейний модуль, макетну плату (breadboard) та набір джамперів. Зовнішній вигляд зібраного пристрою показано на рис. 2.

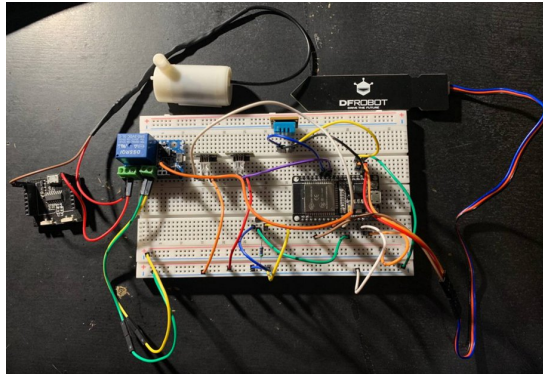


Рис. 2. Макет системи поливу

Для налаштування проекту було обрано середовище PlatformIO IDE, інтегроване з Visual Studio Code. Це рішення забезпечує зручне керування бібліотеками, підтримку різних мікроконтролерів і просту інтеграцію з системами контролю версій. На відміну від Arduino IDE, PlatformIO дозволяє працювати з масштабнішими проектами та автоматизувати процеси збірки і тестування, що робить його більш придатним для досліджуваної системи.

6. Алгоритм роботи системи

Загальний алгоритм роботи автоматичної системи поливу рослин з визначенням рівня вологості ґрунту спроектований таким чином, щоб пристрій міг автономно керувати процесом поливу, регулювати температуру і вологість, а також передавати дані на IoT-платформу ThingSpeak для моніторингу та аналізу.

Після ввімкнення пристрій підключається до Wi-Fi мережі за вказаними параметрами (SSID та пароль). Далі відбувається ініціалізація сенсорів YL-69 та DHT22, а також виконавчих пристроїв. Після цього налагоджується обмін даними з платформою ThingSpeak, куди передаються показники у режимі реального часу. У ході роботи система зчитує показники з сенсорів вологості ґрунту та температури й вологості повітря. Отримані дані порівнюються з пороговими значеннями, які задаються користувачем у налаштуваннях ThingSpeak.

Щодо роботи помпи: у разі зниження рівня вологості ґрунту нижче порогу пристрій активує її роботу. Якщо вологість досягає встановленого рівня до закінчення часу роботи помпи, вона вимикається достроково.

Функції обігріву та охолодження імітуються світлодіодними індикаторами, які вмикаються відповідно до температурних показників: «обігрівач» активується при температурі нижче мінімального порогу, «охолоджувач» — при перевищенні максимального порогу.

Пристрій регулярно передає всі виміряні показники (температуру, вологість повітря, вологість ґрунту) на платформу ThingSpeak, що забезпечує можливість віддаленого моніторингу. Також передаються дані про тривалість роботи помпи та обсяг використаної води.

Після виконання всіх дій система повертається до збору даних і працює у циклічному режимі, безперервно контролюючи умови навколишнього середовища та коригуючи роботу помпи й індикаторів обігріву та охолодження згідно з отриманими значеннями.

Проаналізувавши алгоритм, можна виділити основні характеристики системи: автоматизація всіх процесів без участі користувача, гнучкість налаштувань завдяки віддаленому керуванню пороговими значеннями на платформі ThingSpeak, а також можливість моніторингу роботи пристрою у режимі реального часу через веб-інтерфейс платформи.

7. Програмна реалізація

Програмна реалізація пристрою є важливим етапом створення IoT-системи автоматичного поливу рослин, яка забезпечує взаємодію між апаратними компонентами, мережею та хмарною платформою. На цьому етапі відбувається інтеграція алгоритмів збору та обробки даних із сенсорів, управління виконавчими механізмами та передачі інформації на платформу ThingsBoard Cloud.

У процесі розробки програмного забезпечення здійснено вибір та аналіз необхідних бібліотек, а також опис основні функції і логіка роботи системи. Особлива увага приділена організації взаємодії між сенсорами, мікроконтролером та хмарною платформою через протоколи Wi-Fi та MQTT. Проєкт містить два основних файли - конфігураційний `platformio.ini` та програмний `main.cpp`. Файл `platformio.ini` визначає налаштування платформи і тип плати (ESP32 з фреймворком Arduino), перелік необхідних бібліотек і параметри серійного монітора, що забезпечує ефективне управління проєктом, автоматичне встановлення бібліотек і налаштування середовища розробки.

У файлі `main.cpp` реалізується логіка роботи пристрою: ініціалізація датчиків, модулів і виконавчих пристроїв, початкові налаштування у функції `setup()`, а також циклічне виконання основної логіки у функції `loop()`, що включає зчитування показників із сенсорів, обробку отриманих даних, відправку телеметрії на IoT-платформу та реагування на команди.

Для реалізації функціоналу системи використано ряд бібліотек, кожна з яких відповідає за конкретні завдання. Бібліотека `WiFi.h` відповідає за підключення ESP32 до мережі Wi-Fi, що є необхідною умовою для обміну даними з платформою. `PubSubClient` забезпечує роботу з MQTT-протоколом, що використовується для передачі телеметрії і отримання конфігураційних параметрів. Для роботи з датчиками температури та вологості використовуються бібліотеки `DHT.h`, `OneWire` та `DallasTemperature`, що забезпечують коректне зчитування відповідних показників. Бібліотека `ArduinoJson` застосовується для формування та обробки JSON-повідомлень, які передаються через MQTT, що дозволяє структуровано обмінюватись даними між пристроєм і платформою.

Програмна реалізація охоплює вибір та детальний аналіз використаних бібліотек, які забезпечують роботу з Wi-Fi, MQTT, датчиками та обробкою даних у форматі JSON. На основі цих бібліотек розроблено програмне забезпечення, яке реалізує основні функції пристрою: підключення до Wi-Fi, зчитування даних з датчиків, керування помпою, обігрівачем та охолоджувачем, а також передача телеметрії на платформу ThingsBoard.

У підсумку, реалізована IoT-система є повноцінною інтегрованою автоматизованою платформою для зрошення рослин, яка враховує рівень вологості ґрунту та кліматичні умови (рис. 3). Система відповідає сучасним вимогам до IoT-рішень, таким як надійність, інтерактивність, автоматизація та зручність у використанні.

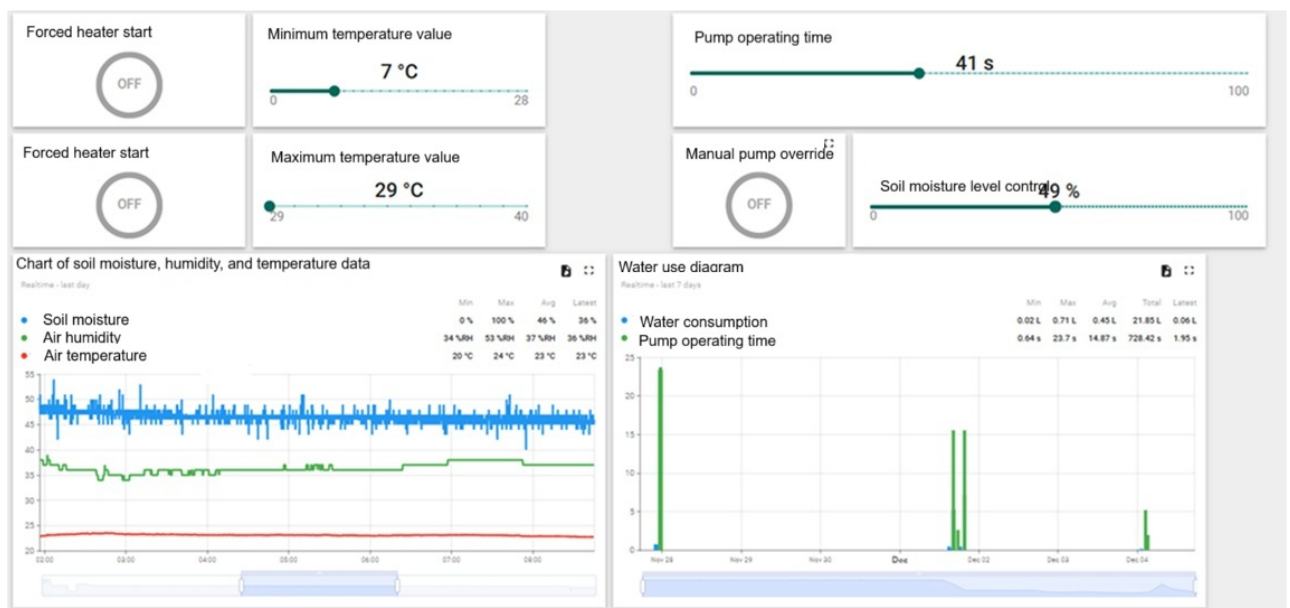


Рис. 3. Вигляд дашборду IoT-платформи для реалізованої системи

Як зазначалося вище, система автоматичного поливу рослин на базі IoT реалізована за допомогою програмного забезпечення, розробленого з використанням Arduino Framework і PlatformIO IDE. Її основна задача — забезпечення моніторингу стану ґрунту і навколишнього середовища, а також керування виконавчими пристроями для підтримки оптимальних умов росту рослин. На початковому етапі роботи пристрій підключається до Wi-Fi мережі за допомогою функції `connectToWiFi()`, яка ініціює підключення, перевіряє його статус і повторює спроби в разі невдачі, доки зв'язок не буде встановлено. Після успішного підключення відбувається з'єднання з хмарною платформою ThingsBoard через MQTT протокол функцією `connectToThingsBoard()`. Ця функція ініціалізує MQTT-клієнта, підписується на необхідні теми і запитує налаштування атрибутів пристрою, таких як пороги вологості або температури.

Для обробки вхідних повідомлень від платформи використовується функція `callback()`, яка приймає

повідомлення у форматі JSON, розбирає їх і оновлює локальні параметри, що визначають пороги та режими роботи пристрою. Це дозволяє в режимі реального часу змінювати налаштування без необхідності перепрограмування.

Основна телеметрія, що включає показники вологості ґрунту, температури та вологості повітря, збирається та відправляється на сервер функцією `sendTelemetry()`. Дані надсилаються у форматі JSON через MQTT, що забезпечує стабільний і структурований обмін інформацією з хмарною платформою. Окрім цього, функція `sendWaterTelemetry()` передає інформацію про кількість використаної води та час роботи помпи, що допомагає контролювати витрати ресурсів.

Сирі аналогові значення вологості ґрунту перетворюються у відсотковий показник за допомогою функції `calibrateSoilMoisture()`, що підвищує точність оцінки стану ґрунту та спрощує подальший аналіз.

Керування виконавчими пристроями реалізоване через відповідні функції. Управління помпою базується на порогах вологості ґрунту і додаткових умовах, таких як примусове вмикання або задана тривалість роботи. Помпа активується, якщо рівень вологості опускається нижче встановленого порогу, та вимикається при досягненні оптимального рівня або по завершенню заданого часу роботи. При цьому система фіксує та відправляє дані про використану воду.

Регулювання температури відбувається шляхом увімкнення обігрівача або охолоджувача залежно від показників температури повітря і встановлених порогів. Якщо температура нижча за мінімальний поріг, вмикається обігрівач; якщо вища за максимальний — охолоджувач. В разі нормальних умов обидва пристрої вимикаються. Крім того, передбачено примусове увімкнення цих пристроїв за допомогою відповідних параметрів.

Функція `setup()` ініціалізує всі компоненти пристрою: встановлює серійний зв'язок для моніторингу, підключається до Wi-Fi і MQTT, ініціалізує датчики вологості і температури, а також налаштовує вихідні та вхідні піни для виконавчих пристроїв. Після цього починається безперервне виконання основної логіки в функції `loop()`, яка циклічно підтримує зв'язок з MQTT-сервером, зчитує дані з сенсорів, приймає рішення на основі отриманих значень, керує помпою, обігрівачем і охолоджувачем, а також відправляє телеметрію на платформу ThingsBoard.

8. Дослідження розробленої IoT-системи

У межах дослідження було проведено детальний аналіз функціонування розробленої IoT-системи автоматичного поливу рослин. Основну увагу було зосереджено на перевірці точності роботи сенсорів, надійності передачі телеметричних даних на платформу ThingsBoard, стабільності роботи у разі збоїв мережевого з'єднання, а також загальній ефективності пристрою в умовах реальної експлуатації.

На початковому етапі оцінювалася робота сенсора вологості ґрунту. Оскільки датчик передає лише аналогові значення, була виконана його попередня калібровка: повністю сухому середовищу відповідало значення 2930, а повному зануренню у воду — 1375. На основі цих параметрів реалізовано алгоритм перетворення аналогових значень у відсоткову шкалу. У ході випробувань у сухому середовищі система фіксувала значення на рівні 0–1%, у частково зволоженому — близько 66–68%, а у вологому — стабільні 100%. Така поведінка підтверджує правильність калібрування сенсора та відповідність результатів очікуваним умовам.

Температурний сенсор було протестовано шляхом порівняння його даних із показниками побутового ртутного термометра. Вимірювання здійснювалися в приміщенні та на вулиці. В приміщенні пристрій зафіксував температуру 23.67 °C при еталонному значенні 23 °C, що дало точність понад 97%. У зовнішніх умовах точність склала приблизно 93%, що свідчить про високу достовірність отриманих значень.

Хоча точна перевірка датчика вологості повітря через відсутність спеціалізованого приладу була ускладненою, середній зафіксований показник становив 36% RH. Це відповідає допустимим значенням вологості повітря в приміщеннях у зимовий період, які зазвичай становлять 30–50%. Таким чином, отримані результати можна вважати обґрунтованими і такими, що відображають реальну картину.

Для оцінки ефективності передачі даних було визначено середній час ініціалізації пристрою — від подачі живлення до надсилання першого повідомлення на платформу. Результат склав 3.653 секунди, що підтверджує швидке встановлення зв'язку. Також було змодельовано втрату з'єднання шляхом тимчасового відключення Wi-Fi-маршрутизатора. Після його повторного ввімкнення передача даних відновлювалася автоматично, без необхідності ручного втручання, що свідчить про стійкість системи до збоїв.

Під час тестування у реальних умовах протягом 24 годин пристрій постійно надсилав актуальні телеметричні дані на платформу ThingsBoard, реагував на зміну показників та забезпечував коректне функціонування виконавчих механізмів. Важливо, що навіть після відключення електропостачання або втрати Wi-Fi-з'єднання, пристрій автоматично відновлював роботу без втрати інформації.

Після завершення всіх етапів тестування було проаналізовано результати роботи системи за дві доби безперервної експлуатації. Усі компоненти працювали стабільно, не було зафіксовано збоїв у передачі даних чи помилок у роботі виконавчих пристроїв. Надіслані телеметричні дані (рис. 4) демонструють стабільну та безперервну роботу пристрою, відображаючи як коливання показників, так і правильне спрацювання системи за наявності відхилень від нормальних умов.

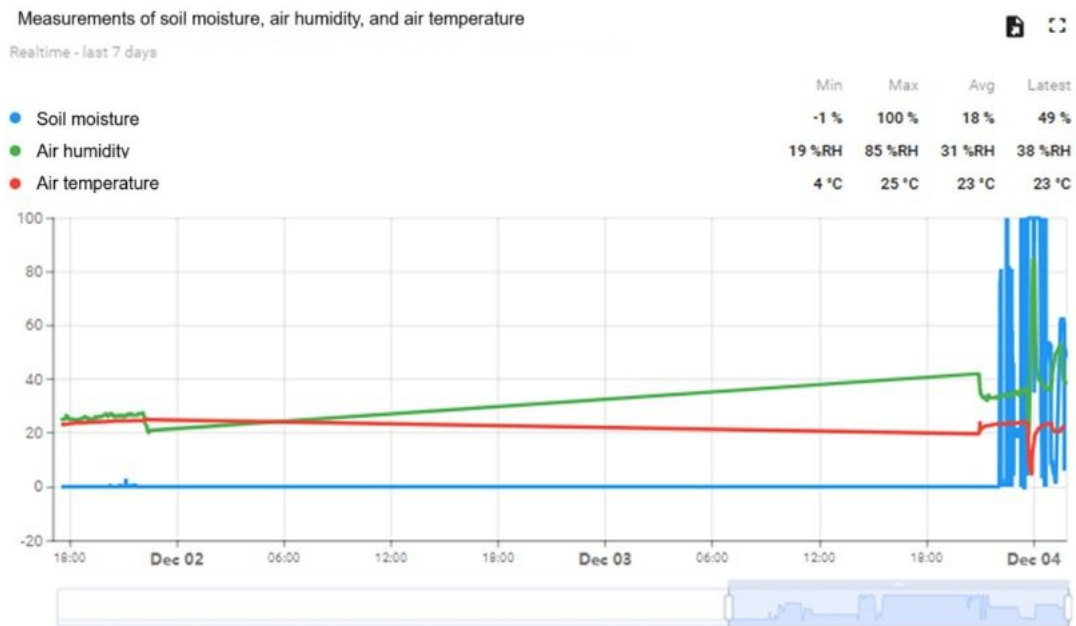


Рис. 4. Результат перевірки коректності роботи пристрою IoT протягом певного періоду часу

9. Conclusions

У цій роботі було створено та досліджено IoT-систему автоматизованого поливу рослин, що базується на вимірюванні вологості ґрунту з подальшим автоматичним керуванням подачею води. Розроблена система включає взаємодію сенсора вологості ґрунту YL-69 та датчика температури й вологості повітря DHT22 з мікроконтролером ESP32, який надсилає дані на платформу ThingSpeak через Wi-Fi-з'єднання та управляє виконавчими пристроями відповідно до встановлених параметрів. У процесі реалізації особливу увагу було приділено вибору апаратного забезпечення, використанню PlatformIO IDE для програмної розробки, а також інтеграції з хмарною платформою для моніторингу та віддаленого керування.

Результати експериментального дослідження засвідчили, що система функціонує стабільно та ефективно в умовах реальної експлуатації. Сенсори продемонстрували прийнятну точність у вимірюваннях, що було підтверджено калібруванням та зіставленням з еталонними пристроями. Система успішно адаптувалася до змін довкілля, своєчасно активуючи полив, а також вмикаючи індикатори обігріву чи охолодження залежно від показників сенсорів. Передача даних на платформу ThingSpeak відбувалася без значних затримок, а після відключення живлення або збоїв з'єднання пристрій автоматично відновлював роботу, зберігаючи повну функціональність.

Разом із тим, дослідження показало, що стабільність з'єднання та час ініціалізації можуть змінюватися залежно від якості Wi-Fi мережі, що варто враховувати під час впровадження системи у середовищах зі слабким сигналом. Незважаючи на це, загальна працездатність і надійність системи залишаються на високому рівні, що підтверджує доцільність її використання в аграрному секторі, тепличному господарстві або в домашніх умовах. Таким чином, створена IoT-система автоматичного поливу відповідає сучасним вимогам до «розумних» систем моніторингу навколишнього середовища, поєднуючи простоту реалізації з надійністю та функціональною гнучкістю. Перспективи подальшого розвитку включають розширення кількості сенсорів, підключення додаткових виконавчих елементів, а також удосконалення програмної логіки для підвищення точності прийняття рішень у динамічних умовах.

Подяка

Автори висловлюють вдячність за підтримку Міністерства освіти і науки України (Проект № 0125U001883).

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що не мають фінансових чи інших потенційних конфліктів, пов'язаних з цією роботою.

Література

- [1] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S.M. Fati, S. A. Bahaj, H. Chaudhry, "A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in smart agriculture", *Agronomy*, 12(1), p. 127, 2022.
- [2] A.L. Duguma, X. Bai, "How the internet of things technology improves agricultural efficiency", *Artificial Intelligence Review*, 58(2), p. 63, 2024.

- [3] A.L. Duguma, X. Bai, "Contribution of Internet of Things (IoT) in improving agricultural systems", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(2), p. 2195–2208, 2024.
- [4] A. Hafian, M. Benbrahim, M.N. Kabbaj, "IoT-based smart irrigation management system using real-time data", *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 13(6), 2023.
- [5] N.C. Gaitan, B.I. Batinas, C. Ursu, F.N. Crainiciuc, "Integrating Artificial Intelligence into an Automated Irrigation System", *Sensors*, 25(4), p. 1199, 2025.
- [6] A. Nawaz, M. Sadiq, Z. Ullah, "GSM Based Canal Gate and Flood Monitoring and Control System", *Journal of Asian Development Studies*, 13(3), p. 1432–1442, 2024.
- [7] N.T. Tsebesebe, K. Mpofo, S. Sivarasu, P. Mthunzi-Kufa, "Arduino-based devices in healthcare and environmental monitoring", *Discover Internet of Things*, 5(1), p. 1–31, 2025.
- [8] S.A. Fathima, "IoT and Big Data Ecosystems: A Comprehensive Review of Technologies, Use Cases, and Research Trends", *International Journal of AI, BigData, Computational and Management Studies*, 1(1), p. 11–23, 2025.
- [9] S. A. Fathima, "IoT and Big Data Ecosystems: A Comprehensive Review of Technologies, Use Cases, and Research Trends", *International Journal of AI, BigData, Computational and Management Studies*, 1(1), p. 11-23, 2025.
- [10] E. Radlbauer, T. Moser, M. Wagner, "Designing a System Architecture for Dynamic Data Collection as a Foundation for Knowledge Modeling in Industry", *Applied Sciences*, 15(9), p. 5081, 2025.
- [11] J.K. Ndegwa, B.M. Gichimu, J.N. Mugwe, M. Mucheru-Muna, D.M. Njiru, "Integrated soil fertility and water management practices for enhanced agricultural productivity", *International Journal of Agronomy*, 2023(1), p. 8890794, 2023.
- [12] C. Ingrao, R. Strippoli, G. Lagioia, D. Huisingh, "Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks", *Heliyon*, 9(8), 2023.
- [13] T. Mutunga, S. Sinanovic, C.S. Harrison, "Integrating wireless remote sensing and sensors for monitoring pesticide pollution in surface and groundwater", *Sensors*, 24(10), p. 3191, 2024.
- [14] C.M. Rosca, A. Stancu, "Integration of AI in Self-Powered IoT Sensor Systems", *Applied Sciences*, 15, p. 7008, 2025.
- [15] G. Sinha, M. Banerjee, "Water Quality Management", *Aquaculture: Trends and Techniques*, *International Journal of Environmental Sciences*, p. 1911–1927, 2025.
- [16] Priya N. Gupta, "Harvesting Tomorrow: Exploring Real-World Applications of AI in Agriculture", *Emerging Smart Agricultural Practices Using Artificial Intelligence*, p. 163–188, 2025.

Data about authors

Лазарук Ілля Сергійович

студент

Кафедра «Спеціалізованих комп'ютерних систем»

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

E-mail: illia.lazaruk.mkisk.2023@lpnu.ua

Кількість статей у загальнодержавних базах даних – 0

Кількість статей у міжнародних базах даних – 0

Illia Lazaruk

Student

Department of Specialized Computer System

Lviv Polytechnic National University

Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

E-mail: illia.lazaruk.mkisk.2023@lpnu.ua

The number of articles in national databases – 0

The number of articles in international databases – 0

Клим Галина Іванівна
Доктор технічних наук, професор
Кафедра «Спеціалізовані комп'ютерні системи»
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013
E-mail: halyna.i.klym@lpnu.ua
Контактний тел.: +38 0978483867
Кількість статей у міжнародних базах даних – 207
Номер ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-0649>

Klym Halyna
Doctor of Technical Sciences, Professor
Department of Spcialized Computer Systems
Lviv Polytechnic National University
Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013
E-mail: halyna.i.klym@lpnu.ua
Contact tel.: +38 0978483867
The number of articles in international databases – 207
Number ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9927-0649>