https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-89
УДК 004.9

ГОВОРУЩЕНКО ТЕТЯНА
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0002-7942-1857
e-mail: hovorushchenko@khmnu.edu.ua
ВОЙЧУР ЮРІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0003-3085-7315
e-mail:voichury@khmnhu.edu.ua
ЛИСЕНКО СЕРГІЙ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0000-0001-7243-8747
e-mail: lysenkos@khmnu.edu.ua
БАЧУК В'ЯЧЕСЛАВ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0009-0007-8465-8908
e-mail: v.bachuk@gmail.com
ПАЙОНК ІЛЛЯ
Хмельницький національний університет
https://orcid.org/0009-0008-4023-0739
e-mail: paionk@gmail.com

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ҐРУНТІВ

У статті обґрунтовано вибір апаратних і комунікаційних компонентів для кіберфізичної системи моніторингу ґрунту. Для нижнього рівня обрано комплекс датчиків: Decagon 5TE для одночасного вимірювання вологості, температури та електропровідності; Bluelab Soil pH Pen для кислотності; ECOFUEL Soil Nutrient Sensor для поживних речовин (N-P-K); та Eijkelkamp Soil Moisture Sensor для додаткового визначення щільності ґрунту. На середньому рівні обрано мікроконтролер ESP32 завдяки його високій обчислювальній потужності, енергоефективності та низькій вартості, що є оптимальним для автономної роботи. Як стандарт зв'язку обрано Wi-Fi, який забезпечує високу швидкість, гнучкість, масштабованість, надійний захист даних і низьку затримку, ідеально задовольняючи потреби системи в реальному часі.

Розроблено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів, що є комплексною технологічною платформою, яка поєднує фізичні датчики, програмне забезпечення, мережеві засоби зв'язку та аналітичні алгоритми для збору, обробки та аналізу даних про стан ґрунту в реальному часі. Система складається з трьох рівнів: нижнього (датчики, що вимірюють фізико-хімічні параметри, такі як вологість, температура, pH, склад поживних речовин, щільність тощо), середнього (контролери, які здійснюють збір і передачу даних) та верхнього (аналітичне програмне забезпечення для обробки інформації, її візуалізації та надання рекомендацій). Основною метою цієї системи є забезпечення точного моніторингу характеристик ґрунту з метою поліпшення аграрного планування, ефективного використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарських земель. Завдяки здатності оперативно виявляти зміни в стані ґрунту, фермери можуть приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення, сівозміни та інших агротехнічних заходів. В умовах змін клімату та зростаючих вимог до продовольчої безпеки впровадження таких систем є критично важливим для сталого розвитку аграрного сектору.

Ключові слова: *кіберфізична система, моніторинг ґрунтів, датчики, контролер, стандарт передачі даних, апаратні складові, архітектура кіберфізичної системи.*

HOVORUSHCHENKO TETIANA, VOICHUR YURII, LYSENKO SERGII
BACHUK VYACHESLAV, PAIONK ILLYA
Khmelnytskyi National University

SOIL MONITORING CYBER-PHYSICAL SYSTEM

The article justifies the choice of hardware and communication components for a cyber-physical soil monitoring system. For the lower level, a set of sensors was selected: Decagon 5TE for simultaneous measurement of humidity, temperature, and electrical conductivity; Bluelab Soil pH Pen for acidity; ECOFUEL Soil Nutrient Sensor for nutrients (N-P-K); and Eijkelkamp Soil Moisture Sensor for additional determination of soil density. For the middle level, the ESP32 microcontroller was selected due to its high computing power, energy efficiency, and low cost, which is optimal for autonomous operation. Wi-Fi was chosen as the communication standard, which provides high speed, flexibility, scalability, reliable data protection, and low latency, ideally meeting the needs of the system in real time.

The architecture of a cyber-physical soil monitoring system has been developed, which is a comprehensive technology platform that combines physical sensors, software, network communications, and analytical algorithms to collect, process, and analyze real-time soil condition data, The system consists of three levels: lower (sensors that measure physicochemical parameters such as humidity, temperature, pH, nutrient composition, density, etc.), middle (controllers that collect and transmit data) and upper (analytical software for processing information, visualizing it and providing recommendations). The main goal of this system is to ensure accurate monitoring of soil characteristics in order to improve agricultural planning, efficient use of resources and increase the productivity of agricultural lands. Due to the ability to promptly detect changes in soil conditions, farmers can make informed decisions regarding irrigation, fertilization, crop rotation and other agrotechnical measures. In the context of climate change and growing requirements for food security, the implementation of such systems is critically important for the sustainable development of the agricultural sector.

Keywords: *cyber-physical system, soil monitoring, sensors, controller, data transmission standard, hardware components, cyber-physical system architecture.*

Вступ

Кіберфізична система моніторингу ґрунтів є надзвичайно актуальною у сучасному сільському господарстві, оскільки вона забезпечує можливість постійного і точного контролю за станом ґрунтового середовища. В умовах змін клімату, виснаження земельних ресурсів і зростання потреби в підвищенні врожайності виникає необхідність у впровадженні технологій, що дозволяють ефективно керувати якістю ґрунту. Кіберфізична система об'єднує фізичні компоненти, такі як датчики, з аналітичними платформами, що працюють у реальному часі, що дає змогу аграріям отримувати оперативну інформацію для прийняття точних рішень. Важливість таких систем також полягає у сприянні збереженню природних ресурсів, оптимізації агротехнологічних процесів і впровадженні інноваційних підходів до ведення сільського господарства, що відповідають сучасним вимогам сталого розвитку [1].

Кіберфізичні системи моніторингу ґрунтів мають кілька важливих переваг. Завдяки автоматизованому збору даних і їх інтеграції з реальним часом, ці системи дозволяють забезпечити більш точне та своєчасне визначення параметрів ґрунту, що істотно покращує прийняття рішень у процесі управління агрономічними роботами. Вони здатні моніторити зміни в ґрунті в режимі реального часу, що дозволяє оперативно коригувати агротехнічні практики та забезпечувати високий рівень родючості і здоров'я ґрунту.

Кіберфізичні системи також допомагають значно зменшити витрати ресурсів, таких як вода і добрива, оскільки точні дані дозволяють оптимізувати їх використання. Вони забезпечують гнучкість в управлінні, адже зібрані дані можна використовувати для розробки прогностичних моделей, що допомагають адаптувати сільськогосподарське виробництво до змінних умов навколишнього середовища, таких як кліматичні зміни [2].

Ще однією перевагою є зменшення людської помилки і покращення точності вимірювань, оскільки ці системи автоматизують процеси збору та обробки даних. Завдяки цьому, агрономи та фермери можуть зосередитися на прийнятті рішень на основі об’єктивних, науково обґрунтованих результатів, що підвищує ефективність та сталий розвиток сільського господарства. Крім того, можливість інтеграції з іншими технологіями, такими як системи моніторингу погодних умов, створює можливість для комплексного управління агросистемами на всіх етапах виробництва [3].

Отже, кіберфізичні системи моніторингу ґрунтів є актуальними, оскільки забезпечують високий рівень точності, ефективності та адаптивності в управлінні агрономічними процесами, що сприяє підвищенню продуктивності та збереженню ресурсів, а також зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. Метою даного дослідження є автоматизація процесу моніторингу ґрунтів, зокрема, шляхом створення кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів.

Існує кілька відомих кіберфізичних систем для моніторингу ґрунтів, які використовуються для аналізу різних параметрів ґрунту. Розглянемо функціонал таких систем.

Agrilink [4] – це система моніторингу ґрунту, розроблена для потреб сільського господарства, яка забезпечує безперервне спостереження за станом ґрунту в реальному часі. Вона інтегрує різноманітні датчики для вимірювання вологості, температури, електропровідності та інших важливих агрономічних параметрів. Отримані дані передаються через бездротові мережі до централізованої платформи, де вони обробляються, аналізуються і візуалізуються для користувачів. Система допомагає фермерам ухвалювати обґрунтовані рішення щодо поливу, внесення добрив і інших агротехнічних заходів, оптимізуючи використання ресурсів і підвищуючи врожайність. Agrilink відзначається простотою встановлення, масштабованістю та можливістю адаптації до різних типів господарств і культур.

SoilSens [5] – це інноваційна система датчиків для сільськогосподарського використання, яка дозволяє точно вимірювати ключові параметри ґрунту, зокрема вологість, температуру і електропровідність. Система орієнтована на надання фермерам оперативної та надійної інформації для оптимізації процесів вирощування культур. Дані, зібрані датчиками, передаються на платформу моніторингу через бездротові технології, що дає змогу в режимі реального часу контролювати стан полів і приймати обґрунтовані рішення щодо поливу та внесення добрив. SoilSens характеризується високою точністю вимірювань, енергоефективністю та можливістю інтеграції з іншими цифровими агротехнологіями.

Sentek [6] – це система моніторингу вологості ґрунту, яка спеціалізується на точному вимірюванні вологи на різних глибинах. Вона використовує зонди з великою кількістю сенсорних елементів, що дозволяють створити детальний профіль ґрунтової вологи по всій товщі кореневого шару. Дані, зібрані системою, передаються до програмного забезпечення для аналізу, де вони візуалізуються у вигляді графіків і звітів, що допомагає аграріям ухвалювати точні рішення щодо режиму поливу. Sentek відома високою точністю, надійністю в польових умовах та можливістю гнучкої інтеграції з іншими агрономічними інформаційними системами. Завдяки цьому вона сприяє підвищенню врожайності, економії водних ресурсів і загальному підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва.

Smartfield [7] – це система моніторингу ґрунтових умов, створена для підтримки ефективного управління сільськогосподарськими угіддями. Вона забезпечує постійне спостереження за такими параметрами, як вологість, температура ґрунту та мікрокліматичні показники, що дозволяє аграріям оперативно реагувати на зміни середовища. Зібрані дані обробляються за допомогою аналітичного програмного забезпечення й надаються користувачу у зручному форматі для ухвалення рішень щодо

поливу, захисту рослин та удобрення. Smartfield вирізняється високою точністю, можливістю роботи в режимі реального часу та легкою інтеграцією з іншими системами аграрного моніторингу, що дозволяє значно підвищити ефективність ведення сільського господарства.

Field Climate [8] – це цифрова платформа для моніторингу погодних умов і стану ґрунту, розроблена для аграрного сектору. Вона об'єднує дані з метеостанцій та ґрунтових датчиків, забезпечуючи точну інформацію про вологість ґрунту, температуру, рівень опадів, вітрові умови та інші важливі показники. Завдяки аналітичним алгоритмам платформа надає прогнози, рекомендації щодо поливу, обробітку полів і захисту рослин, що допомагає мінімізувати ризики та оптимізувати виробничі процеси. Field Climate відома своєю надійністю, гнучкістю налаштувань і можливістю інтеграції в сучасні аграрні технологічні рішення для підвищення продуктивності господарств.

iSyst [9] – це розумна система моніторингу ґрунту, яка забезпечує точне вимірювання основних агрономічних параметрів, таких як вологість, температура, рівень pH та електропровідність. Система використовує мережу датчиків, які збирають дані в режимі реального часу та передають їх до централізованої платформи для подальшого аналізу. Інтелектуальні алгоритми iSyst допомагають аграріям отримувати рекомендації для оптимізації поливу, удобрення та інших агротехнічних заходів. Завдяки своїй модульній архітектурі, простоті впровадження та високій енергоефективності, iSyst є зручним рішенням для підвищення продуктивності сільськогосподарських угідь та збереження природних ресурсів.

Отже, системи моніторингу ґрунтів є ключовим елементом сучасного точного землеробства, і їхня головна перевага полягає у забезпеченні високої точності та деталізації вимірювань ключових агрономічних параметрів, зокрема вологості, температури та електропровідності. Це дає змогу здійснювати моніторинг у реальному часі та оперативно реагувати на зміни в польових умовах, як це забезпечують Agrilink та Smartfield. Завдяки збору й обробці даних, зокрема через інтелектуальні алгоритми iSyst або аналітичне програмне забезпечення Sentek і Field Climate, ці системи надають фермерам обґрунтовані рекомендації, які слугують підтримкою для прийняття рішень щодо поливу, удобрення та захисту рослин. Це безпосередньо призводить до суттєвої економії ресурсів – води, добрив та енергії, оптимізуючи виробничі процеси та підвищуючи загальну врожайність. Крім того, більшість цих рішень, як Agrilink та iSyst, відзначаються простотою встановлення, масштабованістю та гнучкістю, дозволяючи легко адаптуватися до різних типів господарств та інтегруватися з іншими цифровими агротехнологіями. Field Climate додає до цього можливість комплексного моніторингу, поєднуючи дані ґрунту з метеорологічними показниками.

Водночас, впровадження систем моніторингу має певні недоліки. Перш за все, незважаючи на обіцяну простоту, ефективна робота з аналітичними платформами та інтерпретація складних даних і рекомендацій може вимагати від аграріїв спеціальних технічних і агрономічних знань. Крім того, надійна робота систем у режимі реального часу, зокрема, передача даних від енергоефективних датчиків, критично залежить від стабільності бездротового зв'язку та живлення в польових умовах. І нарешті, висока точність вимірювань робить обладнання чутливим до впливу агресивних польових умов, фізичних пошкоджень або необхідності регулярного калібрування.

Вибір апаратних складових кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів

Кіберфізична система моніторингу ґрунтів – це інтегрована технологічна платформа, що поєднує фізичні сенсори, обчислювальні ресурси та програмне забезпечення для автоматизованого моніторингу, аналізу та управління станом ґрунту в режимі реального часу.

Хоч датчик Decagon 5TE і дорожчий, ніж прості однопараметрові датчики, проте він вимірює три ключових для нашої системи параметра одночасно, тому для вимірювання вологості, температури та електропровідності ґрунту використовуватимемо датчик Decagon 5TE. Цей датчик широко застосовується в агрономії, екології та наукових дослідженнях для моніторингу стану ґрунту в реальному часі. Вологість ґрунту визначається за допомогою капаситивного методу вимірювання, що дозволяє точно оцінити кількість води в ґрунті. Це важливий параметр для оптимізації поливу та забезпечення належних умов для росту рослин. Температура ґрунту вимірюється за допомогою вбудованої термопари, що дозволяє отримати дані про температурні зміни в ґрунті. Температура впливає на багато процесів у ґрунті, зокрема на активність мікроорганізмів і рост рослин, тому моніторинг цієї величини є важливим аспектом агрономії. Електропровідність ґрунту є показником концентрації розчинених солей, таких як іони, що важливо для визначення родючості ґрунту та вмісту поживних елементів. Висока електропровідність може вказувати на високу концентрацію солей, що може негативно впливати на здоров'я рослин. Датчик 5TE від Decagon (рис. 1) поєднує ці три параметри в одному пристрої, що дозволяє проводити комплексний моніторинг ґрунту і приймати зважені рішення щодо агротехнічних заходів, таких як полив та внесення добрив. Це робить його корисним для точного сільського господарства, зокрема в умовах, коли потрібно знижувати витрати ресурсів і покращувати продуктивність. Один з важливих аспектів використання 5TE – це його здатність працювати при широкому діапазоні температур і вологості, що дозволяє використовувати датчик в різних кліматичних умовах і під час різних сезонів. Завдяки здатності вимірювати електропровідність, Decagon 5TE також дозволяє визначати наявність потенційних проблем, таких як засолення ґрунту. Цей параметр допомагає агрономам вчасно виявити можливі загрози для родючості ґрунту та вжити заходів для їх нейтралізації.

Рис. 1. Датчик Decagon 5TE для вимірювання вологості, температури та електропровідності ґрунту

Для вимірювання кислотності ґрунту використовуватимемо портативний датчик Bluelab Soil pH Pen – портативний цифровий прилад, призначений для вимірювання кислотності (pH) та температури ґрунту або інших субстратів. Цей інструмент особливо корисний для агрономів, садівників та дослідників, які займаються точним землеробством або гідропонікою. Прилад оснащений високоякісним скляним електродом, що забезпечує точні та стабільні вимірювання. Дисплей з підсвічуванням забезпечує зручне зчитування показників навіть у умовах низької освітленості. Прилад повністю водонепроникний, що дозволяє використовувати його в різних умовах без ризику пошкодження. Завдяки своїй точності, зручності використання та надійності, датчик Bluelab Soil pH Pen (рис. 2) є відмінним вибором для тих, хто прагне забезпечити оптимальні умови для росту рослин через точний моніторинг pH та температури ґрунту. Завдяки своїй мобільності та зручності у використанні, Bluelab Soil pH Pen є відмінним вибором для агрономів та садівників, яким необхідно постійно контролювати стан ґрунту та приймати оперативні рішення щодо коригування pH для забезпечення оптимальних умов для росту рослин.

Рис. 2. Датчик Bluelab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту

Для вимірювання вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій), органічних речовин і мінералів в ґрунті використовуватимемо датчик ECOFUEL Soil Nutrient Sensor, який пропонує найбільш точне вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали, здатний вимірювати солоність, а також рівні азоту (N), фосфору (P) та калію (K) у ґрунті. Ці датчики зазвичай використовують сенсори на основі іонно-селективних електродів або спектроскопічних методів для точного визначення концентрацій поживних елементів у ґрунті. Вони можуть бути інтегровані з різними бездротовими технологіями, такими як RS485, LoRa, Wi-Fi або 4G, що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг та управління даними через мобільні додатки або веб-платформи. Цей датчик (рис. 3) дозволяє швидко та зручно оцінити основні параметри ґрунту без необхідності в хімічних реактивах або спеціалізованому обладнанні. Він оснащений цифровим дисплеєм з підсвічуванням, що забезпечує зручне зчитування результатів навіть у умовах низької освітленості. Крім того, пристрій має водонепроникний корпус, що дозволяє використовувати його в польових умовах без ризику пошкодження. Цей пристрій особливо корисний для агрономів, садівників та дослідників, які прагнуть отримати комплексну інформацію про стан ґрунту для оптимізації умов вирощування рослин. Він дозволяє швидко отримати загальну картину стану ґрунту, що сприяє своєчасному прийняттю рішень щодо поливу, внесення добрив та інших агротехнічних заходів.

Для вимірювання текстури (щільності) ґрунту використовуватимемо датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor (рис. 4), який вимірює не тільки вологість ґрунту, але й щільність ґрунту, що є важливим параметром для оцінки структури ґрунту, і має відносно невисоку ціну. Eijkelkamp Penetrologger є інструментом, що дозволяє оцінювати проникність ґрунту шляхом вимірювання опору проникненню в ґрунт, що може бути корисним для оцінки щільності ґрунту. Цей пристрій оснащений GPS для точного визначення місця вимірювання та може використовуватися для досліджень у сільському господарстві та інженерії.

Рис. 3. Датчик 7-в-1 Soil Nutrient Sensor для вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали

Рис. 4. Датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor для вимірювання текстури (щільності) ґрунту

Для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо контролер ESP32 (рис. 5) – це потужний мікроконтролер із вбудованими модулями Wi-Fi та Bluetooth, який використовується в різних інтернет-пристроях (IoT) та кіберфізичних системах. Це універсальний мікроконтролер, який здатен виконувати складні обчислення та обробляти дані з різних сенсорів, зокрема в проектах для моніторингу ґрунтових параметрів.

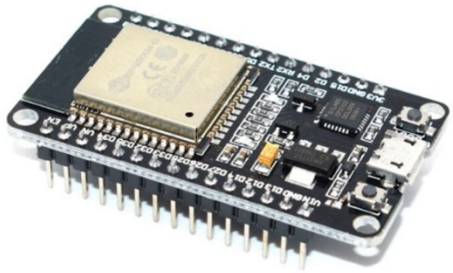

Рис. 5. Контролер ESP32

ESP32 є популярним вибором для створення контролерів в різних сферах, таких як сільське господарство (наприклад, для збору даних з датчиків ґрунту), розумні будинки, автоматизація та інші IoT-проекти завдяки своїй універсальності, можливості працювати з різними видами сенсорів та підтримці бездротового зв'язку.

Використання мікроконтролера ESP32 для створення кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів має низку значних переваг, які роблять його ідеальним вибором для цього застосування. Завдяки наявності потужного двоядерного процесора зі швидкістю обробки до 240 МГц, ESP32 здатний ефективно виконувати паралельні задачі та обробляти великі масиви даних, що надходять від численних ґрунтових датчиків, таких як датчики вологості, температури та pH. Критично важливим елементом є його вбудована підтримка Wi-Fi та Bluetooth, яка забезпечує надійний бездротовий зв'язок для відправлення зібраних даних на централізовану платформу або хмарні сервіси, як-от AWS чи Google Cloud, що є суттю кіберфізичної системи. ESP32 підтримує різноманітні протоколи зв'язку (MQTT, HTTP, WebSocket), що гарантує його гнучку інтеграцію в будь-яке мережеве середовище. Крім того, мікроконтролер має велику кількість пінів для підключення широкого спектра периферійних пристроїв, включаючи як аналогові, так і цифрові датчики ґрунту, а також актуатори для систем поливу. Це дозволяє створювати комплексні та багатофункціональні системи моніторингу. Оскільки системи моніторингу часто працюють в польових умовах на автономному живленні, енергоефективність ESP32, завдяки його режимам низького споживання енергії, є вирішальною перевагою для забезпечення тривалої роботи. Для захисту чутливих агрономічних даних, які передаються через бездротові канали, ESP32 має вбудовані механізми безпеки, включаючи шифрування та аутентифікацію. Нарешті, розширена програмна підтримка та наявність бібліотек, сумісних з Arduino IDE та іншими середовищами, значно спрощує розробку, налаштування та швидке впровадження спеціалізованих додатків для моніторингу ґрунтів.

Стандартом передачі даних у проєктованій системі оберемо Wi-Fi – стандарт бездротової передачі даних, який дозволяє пристроям з’єднуватися з мережами для обміну інформацією без використання проводів. Wi-Fi використовує радіочастоти для передачі даних, що дозволяє створювати мережі, які забезпечують високошвидкісний доступ до Інтернету, з'єднання між пристроями та передачу даних на відстані.

Використання стандарту Wi-Fi для передачі даних у кіберфізичній системі моніторингу ґрунтів має значні переваги, які роблять його оптимальним вибором. Насамперед, Wi-Fi забезпечує високу швидкість передачі даних, що критично важливо для обміну великими обсягами інформації в реальному часі між ґрунтовими сенсорами, контролерами та централізованою платформою моніторингу. Ця висока швидкість у поєднанні з малою затримкою гарантує оперативне надходження даних для прийняття миттєвих рішень щодо поливу чи внесення добрив. Крім того, Wi-Fi пропонує гнучкість і мобільність завдяки бездротовому підключенню, що значно спрощує розгортання та масштабування системи на великих сільськогосподарських угіддях, а також забезпечує можливість одночасного підключення багатьох пристроїв без значної втрати якості з'єднання завдяки таким технологіям, як OFDMA у Wi-Fi 6. Однією з ключових переваг для IoT-пристроїв, що працюють на батареях, є покращена енергоефективність, яку забезпечує функція Target Wake Time (TWT) у Wi-Fi 6, дозволяючи сенсорам планувати активацію радіомодуля та знижуючи загальне споживання енергії. Що стосується інфраструктури, Wi-Fi є широкодоступним стандартом, який підтримується переважною більшістю сучасних пристроїв та мікроконтролерів, що знижує загальну вартість інфраструктури та спрощує інтеграцію. Важливим аспектом є і безпека – підтримка сучасних протоколів, зокрема WPA2/WPA3, забезпечує високий рівень захисту даних, що передаються. Нарешті, Wi-Fi є ідеальною основою для інтеграції з хмарними сервісами, що дозволяє зберігати, аналізувати та використовувати потужні обчислювальні ресурси для складних алгоритмів машинного навчання та прогнозування на основі зібраних даних моніторингу ґрунту.

Виконаний вибір апаратних складових для кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів є оптимальним і спрямований на забезпечення комплексного, точного та ефективного збору даних. Застосування датчика Decagon 5TE для одночасного вимірювання вологості, температури та електропровідності є економічно виправданим, а його доповнення портативними датчиками Bluelab Soil pH Pen та ECOFUEL Soil Nutrient Sensor дозволяє отримати повний спектр агрономічних параметрів, включаючи кислотність, щільність та вміст ключових поживних елементів (N-P-K). «Серцем» системи обрано мікроконтролер ESP32 завдяки його потужному процесору, енергоефективності та вбудованій підтримці Wi-Fi, що робить його ідеальним для автономної роботи в полі та оперативної передачі даних.

Таким чином, обрані компоненти гарантують точність, мобільність та надійність збору даних, забезпечуючи високошвидкісний зв'язок для інтеграції системи з хмарними обчисленнями.

Кіберфізична система моніторингу ґрунтів

Збір, моніторинг та керування даними у кіберфізичній системі моніторингу ґрунтів є основою для ефективного управління сільськогосподарськими процесами. Збір даних починається на нижньому рівні, де датчики вимірюють різноманітні параметри ґрунту, такі як вологість, температура, pH та рівень поживних речовин. Ці дані передаються через контролери, такі як ESP32, до центральної платформи збору даних, що забезпечує обробку і зберігання інформації.

Моніторинг даних здійснюється через програмні інтерфейси, що дозволяють в реальному часі отримувати інформацію про стан ґрунту. Це може бути вебзастосунок або мобільний застосунок, де користувачі (фермери, агрономи) можуть переглядати показники параметрів ґрунту, виявляти аномалії або змінювати налаштування системи. Завдяки інтеграції з іншими системами, наприклад, для зрошення, моніторинг також дозволяє автоматично регулювати процеси, що впливають на стан ґрунту.

Керування даними на верхньому рівні включає в себе прийняття рішень на основі отриманих показників. Алгоритми аналізу даних дозволяють передбачити зміни в умовах ґрунту, оптимізувати використання води та добрив, а також планувати необхідні заходи для підтримки здоров’я ґрунту. Інтерфейс користувача надає зручний доступ до всіх функцій, забезпечуючи швидкий доступ до інформації та можливість налаштування або коригування параметрів системи для досягнення бажаних результатів. Керування даними також включає постійну адаптацію системи до нових вимог і змін. Наприклад, система може адаптуватися до сезонних змін, знижуючи або збільшуючи частоту вимірювань, залежно від погодних умов або етапу росту рослин. Крім того, постійне оновлення і перевірка даних забезпечує надійність інформації, що дозволяє агрономам планувати своєчасні заходи для покращення стану ґрунту.

Блок-схема узагальненого алгоритму збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів представлена на рис. 6.

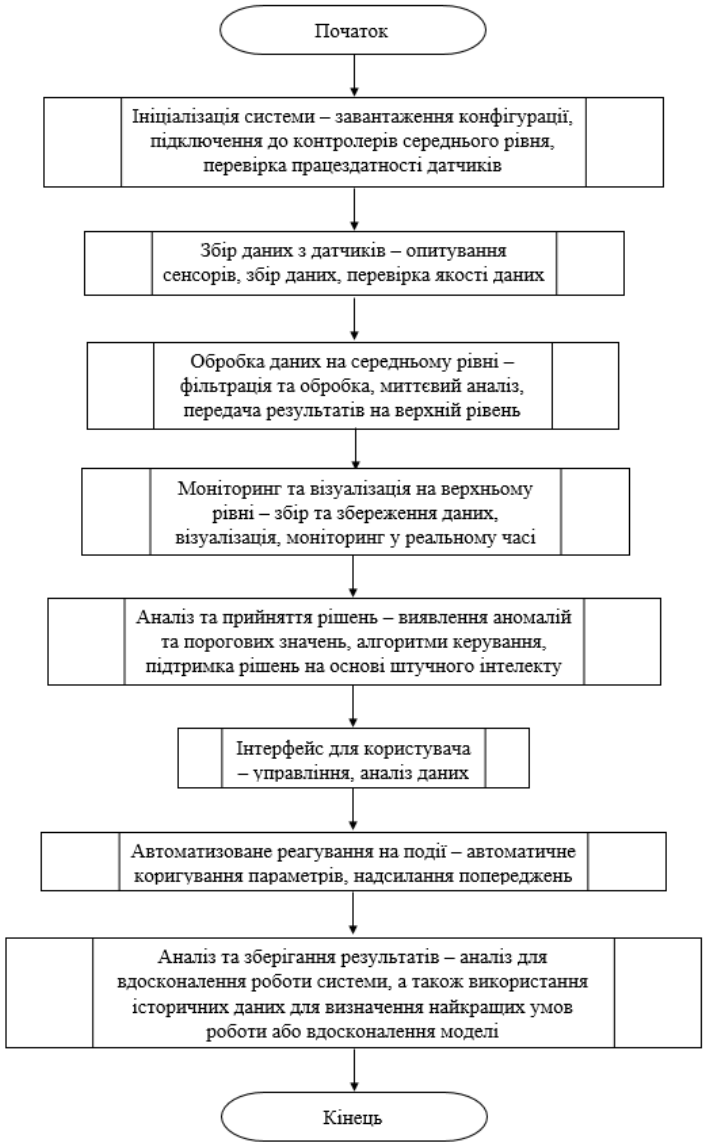

Рис. 6. Блок-схема узагальненого алгоритму збору, моніторингу та керування даними кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів

Основні елементи кіберфізичної системи визначення параметрів грунту включають:

1) датчики Decagon 5TE, які вимірюють вологість, температуру та електропровідність ґрунту
2) портативні датчики Bluelab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту;
3) датчики ECOFUEL Soil Nutrient Sensor для точного вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали;
4) датчики Eijkelkamp Soil Moisture Sensor, які вимірюють щільність ґрунту;
5) контролер ESP32, який є потужним енергоефективним пристроєм з багатьма можливостями підключення, є чудовим варіантом для бездротових систем з низьким енергоспоживанням, особливо враховуючи його низьку ціну;
6) стандарт передачі даних Wi-Fi, який підтримує високу швидкість передачі даних, дозволяє з'єднуватися з мережею без необхідності проводів, підтримується більшістю сучасних пристроїв, має порівняно недорогу інфраструктуру, легко масштабується, підтримує сучасні протоколи безпеки, має низьку затримку передачі даних, дозволяє підключати багато пристроїв одночасно без значних втрат в швидкості або якості з'єднання.

Спроєктуємо архітектуру кіберфізичної системи моніторингу грунтів – рис. 7.

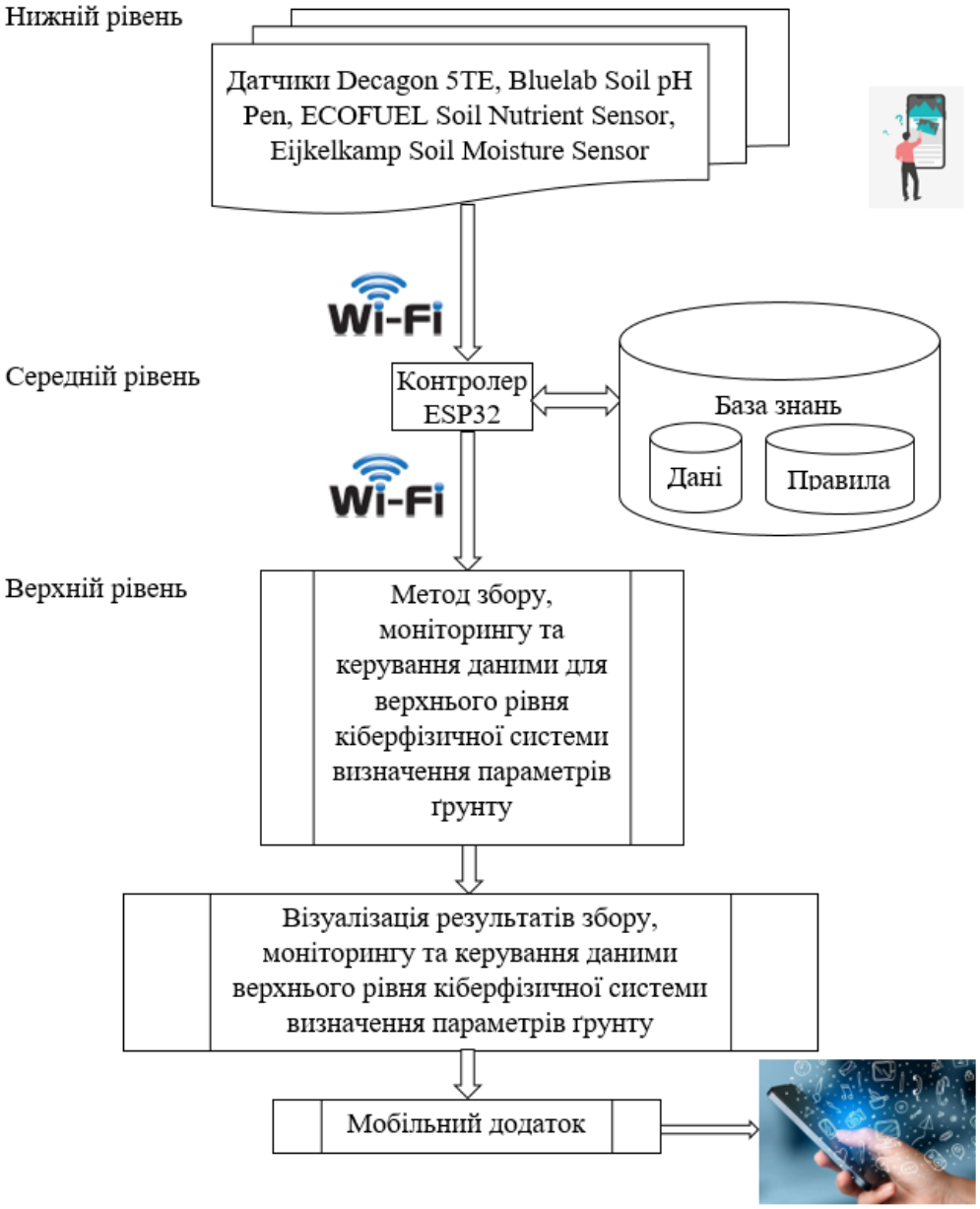

Рис. 7. Архітектура кіберфізичної системи моніторингу грунтів

Розроблена кіберфізична система моніторингу ґрунтів – це інтегрована технологічна платформа, яка поєднує фізичні датчики, програмне забезпечення, мережеві засоби зв'язку та аналітичні алгоритми для збору, обробки та аналізу інформації про стан ґрунту в реальному часі. Така система складається з трьох рівнів: нижнього (датчики для вимірювання фізико-хімічних показників – вологість, температура, pH, склад поживних речовин, щільність тощо), середнього (контролери, що збирають і передають дані), та

верхнього (аналітичне програмне забезпечення, яке обробляє інформацію, візуалізує її та надає рекомендації). Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту є важливим інструментом для забезпечення економічної ефективності, екологічної стабільності та сталого розвитку аграрного сектору в умовах сучасних викликів.

Розглянемо приклад роботи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Фермерське господарство впроваджує кіберфізичну систему для оптимізації поливу та удобрення. На полі встановлюються мультифункціональні датчики: Decagon 5TE, Bluelab Soil pH Pen, ECOFUEL Soil Nutrient Sensor та Eijkelkamp Sensor. Дані з усіх датчиків збираються енергоефективним контролером ESP32 і миттєво передаються через Wi-Fi на центральний сервер або в хмару. Програмне забезпечення на сервері або в хмарі отримує дані від датчиків у реальному часі. Всі виміряні параметри (вологість, температура, pH, рівень поживних речовин, щільність ґрунту тощо) аналізуються для виявлення потенційних проблем, таких як низька вологість чи недостатній вміст певних елементів. Аналітичний модуль обробляє ці дані, порівнюючи їх з оптимальними значеннями для кожної культури. У разі відхилень, аналітичний модуль автоматично генерує рекомендації та попередження (наприклад, про необхідність поливу або коригування pH). На основі аналізу даних система надає фермеру рекомендації щодо коригування агротехнічних заходів. Наприклад, якщо вологість ґрунту низька, система може запропонувати поливати поле, а якщо pH занадто кисле, порекомендувати застосувати лужне добриво. Ці рекомендації відображаються у вебінтерфейсі або мобільному застосунку фермера і можуть використовуватися для автоматичного управління поливними системами або для точного внесення добрив. Система може автоматично налаштувати поливні системи, щоб забезпечити оптимальний рівень вологості ґрунту, або ж надати точні вказівки фермеру щодо необхідності внесення добрив на конкретних ділянках поля. У результаті фермер знижує витрати ресурсів і підвищує врожайність завдяки точному моніторингу та корекції стану ґрунту.

Цей приклад демонструє, як кіберфізична система може інтегрувати дані з різних сенсорів і аналітичних платформ для автоматизації та оптимізації агрономічних процесів, що має значний вплив на підвищення ефективності агробізнесу.

Висновки

У статті обґрунтовано вибір апаратних і комунікаційних компонентів для кіберфізичної системи моніторингу ґрунту. Для нижнього рівня обрано комплекс датчиків: Decagon 5TE для одночасного вимірювання вологості, температури та електропровідності; Bluelab Soil pH Pen для кислотності; ECOFUEL Soil Nutrient Sensor для поживних речовин (N-P-K); та Eijkelkamp Soil Moisture Sensor для додаткового визначення щільності ґрунту. На середньому рівні обрано мікроконтролер ESP32 завдяки його високій обчислювальній потужності, енергоефективності та низькій вартості, що є оптимальним для автономної роботи. Як стандарт зв'язку обрано Wi-Fi, який забезпечує високу швидкість, гнучкість, масштабованість, надійний захист даних і низьку затримку, ідеально задовольняючи потреби системи в реальному часі.

Розроблено архітектуру кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів, яка складається з трьох рівнів: нижнього (датчики, що вимірюють фізико-хімічні параметри, такі як вологість, температура, pH, склад поживних речовин, щільність тощо), середнього (контролери, які здійснюють збір і передачу даних) та верхнього (аналітичне програмне забезпечення для обробки інформації, її візуалізації та надання рекомендацій). Основною метою цієї системи є забезпечення точного моніторингу характеристик ґрунту з метою поліпшення аграрного планування, ефективного використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарських земель. Завдяки здатності оперативно виявляти зміни в стані ґрунту, фермери можуть приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення, сівозміни та інших агротехнічних заходів. В умовах змін клімату та зростаючих вимог до продовольчої безпеки впровадження таких систем є критично важливим для сталого розвитку аграрного сектору.

Література

1. Marzouk I., Oberhollenzer S., Tschuchnigg F. An automated system for determining soil parameters: Case study. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 544. P. 04002.

2. An IoT-Based System to Monitor Soil Parameter of Harumanis Tree / M. F. A. M. Zaini et al. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Singapore, 2024. P. 241–255.

3. Temperature and Soil Parameter Monitoring System / P. U. Sharma et al. *Recent Advances in Civil Engineering for Sustainable Communities*. Singapore, 2024. P. 385–393.

4. AgriLink. Agricultural Knowledge: Linking farmers, advisors and researchers to boost innovation. URL: https://cordis.europa.eu/project/id/727577.

5. Make the smartest irrigation decisions with SoilSense. URL: https://soilsense.io/.

6. Sentek: Your soil moisture monitoring specialists for smarter irrigation. URL: https://sentektechnologies.com/.

7. SmartField Technologies. URL: https://smartfield.tech/.

8. FieldClimate: The robust and powerful platform for all your AG decision needs. URL: https://metos.global/en/fieldclimate/.

9. iSyst (Smart Soil Monitoring System). URL: https://isyst.de/en/.