

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Спеціальність 123 – Комп'ютерна інженерія

на тему «Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту»

КвРКІ.302185.23.15.63 ПЗ

Виконав: студент 2 курсу, група КІ2м-23-2

Керівник доктор філософії, ст. викладач
Науковий ступінь, вчене звання

До захисту допускаю:

Зав. кафедри КІС, д.ф., доц.

Ольга ПАВЛОВА

5 05 2025 р.


Підпис

Ілля ПАЙОНК
Ініціали, прізвище


Підпис

Юрій ВОЙЧУР
Ініціали, прізвище

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

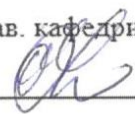
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА



“ 01 ” 11 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Ілля ПАЙОНКА

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Керівник проекту (роботи) Юрій ВОЙЧУР, д.ф., старший викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 08.01.2025 р. № 8

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Аналіз відомих методів та рішень для моніторингу параметрів ґрунту

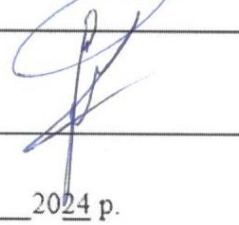
Вибір компонентів для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Метод та алгоритм збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Сергій ЛИСЕНКО, професор кафедри КІПС		
Антиплагіат	Андрій НІЧЕПОРУК, доцент кафедри КІПС		

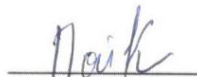
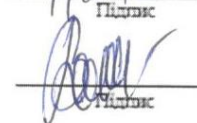
7. Дата видачі завдання « 02 » 09 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) Кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	02.09.2024	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.10.2024	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих моделей, методів за темою; постановка задачі	01.11.2024	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	01.12.2024	виконано
5	Робота над науковою статтею	01.02.2025	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методів для вирішення поставленої задачі	15.02.2025	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розробка ПЗ для вирішення поставленої задачі, експериментальна частина	01.04.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	18.04.2025	виконано
9	Попередній захист кваліфікаційної роботи	25.04.2025	виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК	До 20.05.2025	

Студент

Керівник роботи


Підпис

Підпис

Ілля ПАЙОНК
Ініціали, прізвище

Юрій ВОЙЧУР
Ініціали, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи: Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.

Автор роботи: Пайонк І.С., студент групи КІ2М-23-2.

Керівник роботи: Войчур Ю.О., доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем.

Пояснювальна записка: 101 с., 9 рис., 5 табл., 2 дод., 85 джерел.

ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: кіберфізична система, параметри ґрунту, датчики вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту, контролери, стандарти передачі даних.

Об'єктом дослідження є процес визначення параметрів ґрунту.

Предметом дослідження є метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.

Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів, теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

Наукова новизна отриманих результатів: вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, що відрізняється від існуючих аналогів зниженими витратами на впровадження, спрощеним процесом

експлуатації та забезпечує високоефективний збір, моніторинг і керування даними різних параметрів із їх збереженням у режимі реального часу.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, яка забезпечує ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень визначення параметрів ґрунту. У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту та вибір стандарту передачі даних. В розділі 3 розроблено метод визначення параметрів ґрунту, який становить основу кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. В розділі 4 кваліфікаційної роботи спроектовано вдосконалену архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ	8
1.1 Відомі кіберфізичні системи визначення параметрів ґрунту.....	8
1.2 Визначення параметрів ґрунту	17
1.3 Висновки. Постановка задачі.....	23
2 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ	25
2.1 Вибір датчиків для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту....	25
2.2 Вибір контролеру та стандарту передачі даних для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту	41
2.3 Висновки	49
3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ЗБОРУ, МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ДАНИМИ ДЛЯ ВЕРХНЬОГО РІВНЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ	51
3.1 Метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту	51
3.2 Алгоритм збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту	59
3.3 Висновки	61
4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ	63
4.1 Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.....	63
4.2 Проєктування та приклад роботи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту	67
4.3 Висновки	71

ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	76
ДОДАТОК А.....	84
ДОДАТОК Б	94

ВСТУП

Актуальність визначення параметрів ґрунту має велике значення в ряді наукових та практичних галузей, оскільки ґрунти є основою для сільського господарства, екології та будівництва. Для оптимального вирощування рослин необхідно знати такі параметри, як структура ґрунту, його кислотність (pH), вологість, вміст поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин. Визначення цих параметрів дозволяє розробити точні рекомендації для удобрення, поливу та вибору найбільш підходящих культур для конкретних умов [1].

Аналіз параметрів ґрунту є важливою частиною моніторингу екологічного стану територій. Зміни в складі ґрунту можуть сигналізувати про забруднення, ерозію або інші негативні процеси. Дослідження ґрунту допомагає визначити вплив антропогенних факторів на екосистеми і вжити заходів для збереження біорізноманіття. Параметри ґрунту, такі як несуча здатність, щільність, проникність води, вологоємність, є критичними для проектування та будівництва різноманітних об'єктів, від житлових будинків до великих інфраструктурних проєктів. Знання цих характеристик дозволяє уникнути проблем з фундаментами, осіданням ґрунту або затопленнями в майбутньому [2].

Ґрунти взаємодіють з атмосферою і регулюють вуглецевий цикл, тому їх аналіз є важливим для дослідження змін клімату. Визначення параметрів ґрунту допомагає оцінити здатність ґрунтів до поглинання вуглецю, що має важливе значення для розуміння кліматичних змін і планування заходів з їх пом'якшення. Забруднення ґрунтів важкими металами, пестицидами або іншими токсичними речовинами потребує швидкого визначення параметрів для вжиття заходів щодо очищення. Технології сталого розвитку передбачають моніторинг і поліпшення якості ґрунтів, що безпосередньо впливає на продуктивність землеробства та екологічну ситуацію [3].

Визначення параметрів ґрунту є основою для правильного управління природними ресурсами та сталого розвитку. Важливість цього процесу зростає у світлі сучасних викликів, таких як зміни клімату, забруднення навколишнього

середовища та зниження родючості ґрунтів. Оскільки ґрунт є не лише середовищем для вирощування рослин, але й невід'ємною частиною екосистеми, його стан безпосередньо впливає на здоров'я людей, тварин та рослин. Правильне визначення фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунту дозволяє своєчасно реагувати на зміни в навколишньому середовищі та розробляти ефективні стратегії для збереження і відновлення природних ресурсів. Крім того, дослідження ґрунтів є необхідним для розробки нових технологій в сільському господарстві. Наприклад, визначення рівня вологи в ґрунті дозволяє створювати системи поливу, що максимально ефективно використовують воду, а також допомагає в розробці методів боротьби з посухами або іншими кліматичними явищами. Водночас аналіз хімічного складу ґрунту дає змогу точніше дозувати добрива, що сприяє підвищенню врожайності без шкоди для екології [4].

У контексті будівництва, знання параметрів ґрунту дозволяє уникнути серйозних технічних проблем. Наприклад, неправильне визначення щільності ґрунту може призвести до осідання будівель, що створює небезпеку для їх стійкості. Переконливі дослідження та точні дані дозволяють також знижувати витрати на будівельні матеріали, підвищуючи надійність конструкцій.

Усе це підтверджує, що правильне визначення параметрів ґрунту є ключовим елементом для збереження стабільного і здорового середовища як для людей, так і для природи в цілому. Таким чином, цей процес не лише важливий, але й надзвичайно актуальний для розвитку суспільства, особливо в умовах сучасних екологічних і технологічних викликів [5].

Отже, визначення параметрів ґрунту є необхідним для забезпечення сталого розвитку, оптимізації сільськогосподарської діяльності, а також для екологічної безпеки та збереження природних ресурсів. *Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (pH) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.*

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для визначення параметрів ґрунту;
- 2) моделювання процесу визначення параметрів ґрунту;
- 3) розроблення методу збору, моніторингу та керування даними для визначення параметрів ґрунту;
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

Об'єктом дослідження є процес визначення параметрів ґрунту.

Предметом дослідження є метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.

Наукова новизна отриманих результатів: вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, що відрізняється від існуючих аналогів зниженими витратами на впровадження, спрощеним процесом експлуатації та забезпечує високоефективний збір, моніторинг і керування даними різних параметрів із їх збереженням у режимі реального часу.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, яка забезпечує ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених задач використовуються основні положення системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та ін.), загальної теорії систем, теорії моделювання процесів, теоретико-множинні підходи, методи концептуального моделювання, евристичні оцінки, принципи побудови баз знань та формування логічного висновку.

За темою кваліфікаційної роботи прийнята до публікації одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

- 1) Yu. Voichur, I. Payonk. Cyber-physical system for determining soil parameters. Computer systems and information technologies. 2025. №2.

1 АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ ТА РІШЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ

1.1 Відомі кіберфізичні системи визначення параметрів ґрунту

Кіберфізична система (КФС) для визначення параметрів ґрунту 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. КФС 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.

Кіберфізична система для визначення параметрів ґрунту є інноваційним рішенням, яке поєднує фізичні сенсори, комп'ютерні алгоритми та мережеві технології для моніторингу та аналізу стану ґрунту в реальному часі. Такі системи дозволяють автоматизувати процес збору даних про параметри ґрунту, що є надзвичайно важливим для сільського господарства, екології та будівництва [6, 7].

Основні компоненти кіберфізичної системи [8-10]:

1. Сенсори – спеціалізовані датчики, що вимірюють різноманітні параметри ґрунту, такі як вологість, температура, рН, електричну проводимість, вміст органічних речовин і мінералів. Сенсори можуть бути вбудовані в ґрунт або встановлені на його поверхні, а також інтегровані в автоматизовані системи для збирання даних.

2. Модуль обробки даних – зібрані дані передаються на центральну обчислювальну платформу, де вони обробляються за допомогою алгоритмів

машинного навчання або аналітичних моделей. Це дозволяє виявити кореляції між різними параметрами ґрунту та зробити точні прогнози щодо його стану.

3. Мережі передачі даних – використовуються бездротові або проводові мережі для передачі інформації від сенсорів до обробних систем. Це дозволяє здійснювати моніторинг у реальному часі і отримувати віддалений доступ до даних з будь-якої точки світу.

4. Інтерфейс користувача – зазвичай система надає інтерфейс для користувачів (агрономів, інженерів, екологів), через який можна отримати результати моніторингу, переглянути статистику, налаштувати параметри сенсорів або отримати попередження про зміну параметрів ґрунту.

Кіберфізичні системи для визначення параметрів ґрунту мають кілька важливих переваг, що робить їх дуже ефективними у сучасному сільському господарстві. 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.

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.

Отже, кіберфізичні системи для визначення параметрів ґрунту 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.

Крім того, кіберфізичні системи дають можливість знижувати витрати на обслуговування та моніторинг, оскільки автоматизація процесів значно зменшує потребу в постійному залученні людських ресурсів для збору і аналізу даних. Це також дозволяє знижувати ймовірність помилок, пов'язаних з людським фактором, та забезпечує більш стабільну роботу системи в умовах постійних змін.

Ці системи також можуть сприяти зменшенню впливу на довкілля завдяки точному вимірюванню та моніторингу параметрів ґрунту. Вони дозволяють знизити використання хімічних добрив та пестицидів, оскільки точні дані допомагають приймати більш зважені рішення щодо їх внесення. Таким чином, кіберфізичні системи сприяють розвитку сталого сільського господарства, що важливо для збереження екологічного балансу та продовольчої безпеки.

Іншою перевагою є можливість інтеграції з іншими інноваційними технологіями, такими як супутникові системи моніторингу або безпілотні літальні апарати (дрони), що забезпечують ще більшу точність у зборі даних про ґрунт і навколишнє середовище. Це дозволяє ще детальніше досліджувати і розуміти динаміку змін у ґрунтовому середовищі на великих площах, що є особливо корисним для великих агрогосподарств і фермерських об'єднань.

Крім того, кіберфізичні системи здатні зберігати та аналізувати великі обсяги даних, що дозволяє створювати історичні бази даних та проводити тривалий моніторинг змін. Це дає можливість виявляти довготривалі тренди, оцінювати ефективність застосовуваних агротехнічних практик та прогнозувати майбутні зміни в умовах ґрунту, що допомагає приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Загалом, впровадження кіберфізичних систем для визначення параметрів ґрунту є важливим кроком до інтеграції технологій в аграрний сектор, що дозволяє

підвищити ефективність виробництва, зберегти природні ресурси і досягти сталого розвитку в умовах змінного клімату та зростаючих потреб у продовольстві.

Переваги кіберфізичних систем для визначення параметрів ґрунту [11-13]:

1. Точність і оперативність – КФС дозволяє здійснювати точні вимірювання параметрів ґрунту в реальному часі, що особливо важливо для агробізнесу, де зміни у вологості або кислотності ґрунту можуть безпосередньо впливати на врожай.

2. Автоматизація процесу – завдяки автоматизації збору та обробки даних, КФС мінімізує людський фактор та знижує витрати на ручні вимірювання, що дозволяє зекономити час та ресурси.

3. Прогнозування та адаптація – на основі аналізу отриманих даних система може робити прогнози щодо змін у стані ґрунту, таких як ризик засухи, ерозії або зміни кислотності, і пропонувати оптимальні рішення для адаптації.

4. Вдосконалення агротехнологій – завдяки точним даним, фермери можуть розробляти індивідуальні стратегії з поливу, удобрення та обробки ґрунту, що сприяє підвищенню ефективності вирощування сільськогосподарських культур і збереженню природних ресурсів.

5. Екологічність – визначення точних параметрів ґрунту дозволяє знижувати використання хімічних добрив і води, що має позитивний вплив на довкілля, сприяючи сталому розвитку сільського господарства та охороні екосистем.

Кіберфізичні системи для визначення параметрів ґрунту відкривають нові можливості для точного землеробства, оскільки забезпечують безперервний моніторинг важливих характеристик ґрунту в режимі реального часу. Вони підвищують ефективність збору даних завдяки автоматизації процесів та мінімізації людського фактора, що зменшує ймовірність помилок. Завдяки глибокому аналізу даних такі системи дозволяють своєчасно виявляти зміни у стані ґрунту і приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення чи обробки полів. Крім того, кіберфізичні системи сприяють раціональному використанню ресурсів, підвищенню врожайності та зниженню витрат, що робить аграрне виробництво більш стійким та технологічно розвиненим.

Кіберфізичні системи для моніторингу ґрунтів активно використовуються в сільському господарстві для точного контролю рівня вологості та рН ґрунту, а також для моніторингу процесів ерозії або зношування ґрунту. Це дозволяє не лише покращити врожайність, але й знизити витрати на полив та внесення добрив. У будівництві таку систему використовують для визначення характеристик ґрунту, що дозволяє зберігати стійкість будівельних об'єктів і запобігати небажаним наслідкам через неправильні будівельні роботи [14, 15].

Кіберфізична система для визначення параметрів ґрунту є потужним інструментом, який допомагає не лише оптимізувати процеси агрономії та будівництва, а й зберігати природні ресурси та забезпечувати екологічну стабільність. З впровадженням таких технологій значно зростає ефективність управління ґрунтовими ресурсами, що є важливим кроком у напрямку сталого розвитку і збереження довкілля [16-18].

Існує кілька відомих кіберфізичних систем для моніторингу ґрунтів, які використовуються для аналізу різних параметрів ґрунту, таких як вологість, температура, рН, органічний вміст і інші фактори, що впливають на сільське господарство та екологію [19-22].

Ось кілька прикладів таких систем.

Agrilink (Система моніторингу ґрунту для сільського господарства) [23] – 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.

Основні функції:

- Вимірювання рівня вологості ґрунту, температури та рівня рН.
- Збір та аналіз даних за допомогою бездротових датчиків.
- Прогнозування та оптимізація поливу на основі аналізу ґрунтових параметрів.

- Адаптація під різні сільськогосподарські культури.

Переваги:

- Зменшення витрат на воду та добрива.
- Підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва.
- Інтерфейс для фермерів для аналізу та налаштування параметрів моніторингу.

SoilSens (Soil Sensors for Agriculture) [24] – 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 для підвищення загальної ефективності управління сільськогосподарським виробництвом.

Основні функції:

- Використовує сенсори для вимірювання вологості, рН, температури та електричної провідності ґрунту.
- Платформа дозволяє отримувати дані в реальному часі через мобільний додаток або веб-інтерфейс.
- Може інтегруватися з іншими агрономічними системами для покращення ефективності поливу.

Переваги:

- Легкість у встановленні та налаштуванні системи.

- Підвищення врожайності через точне управління ресурсами.
- Підтримка сталого розвитку сільського господарства.

Sentek (Soil Moisture Monitoring Systems) [25] – 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.

Основні функції:

- Спеціалізується на моніторингу вологості ґрунту та гідрологічних характеристик.
- Вимірює рівень вологості на різних глибинах ґрунту, що дозволяє фермеру точніше контролювати полив.
- Використовує комбінацію датчиків і мережу для передачі даних в реальному часі.

Переваги:

- Покращує ефективність зрошення.
- Дозволяє знижувати витрати води, що є важливим для водозберігаючих агротехнологій.
- Допомагає зберігати ґрунтові ресурси і зменшувати ерозію.

Smartfield (Система моніторингу ґрунтових умов) [26] – 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.

Основні функції:

- Призначена для вимірювання параметрів ґрунту, таких як вологість, температура та рН.
- Забезпечує дані для агрономів і фермерів, щоб вони могли точно налаштовувати умови для росту культур.
- Має можливість налаштовувати автоматичний полив і здійснювати контроль за зрошенням.

Переваги:

- Простота в інтеграції з іншими агрономічними системами.
- Автоматизація контролю за станом ґрунту.
- Оптимізація використання водних та земельних ресурсів.

Field Climate (Платформа для моніторингу погодних умов і ґрунту) [27] – 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.

Основні функції:

- Спеціалізується на моніторингу різних параметрів погодних умов і стану ґрунту.

- Використовує датчики для визначення вологості ґрунту, температури та інших факторів, що впливають на здоров'я рослин.
- Може забезпечити точні прогнози та рекомендації на основі зібраних даних.

Переваги:

- Високий рівень автоматизації моніторингу.
- Інтеграція з мобільними додатками для доступу до даних в реальному часі.
- Можливість зменшення використання води та хімічних добрив.

iSyst (Smart Soil Monitoring System) [28] – це розумна система моніторингу ґрунту, яка забезпечує точне вимірювання основних агрономічних параметрів, таких як вологість, температура, рівень рН 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.

Основні функції:

- Використовує високоточні сенсори для моніторингу кількості води в ґрунті, рівня рН, електричної провідності та температури.
- Дані передаються через бездротові канали до центральної системи для аналізу та відображення на інтерфейсі користувача.

Переваги:

- Висока точність вимірювань і можливість налаштування параметрів системи.
- Допомагає в управлінні водними ресурсами та підвищенні продуктивності агровиробництва.

Кіберфізичні системи для моніторингу ґрунтів активно використовуються для точного збору даних про стан ґрунту та управління природними ресурсами.

Вони дають змогу фермерам і екологам здійснювати більш точний і ефективний контроль за якістю ґрунту, що важливо для збереження родючості землі, підвищення врожайності та сталого розвитку сільського господарства. Системи також дозволяють зменшити вплив на навколишнє середовище, оптимізуючи використання води та добрив [29-31].

Отже, задача створення кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту є актуальною. Відтак наше дослідження присвячене розробленню методу та кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту.

1.2 Визначення параметрів ґрунту

Визначення параметрів ґрунту – це процес вимірювання та аналізу різних характеристик ґрунту, таких як вологість, температура, кислотність (pH), електропровідність, органічний вміст та текстура. Ці параметри є важливими для оцінки стану ґрунту, його родючості та здатності забезпечити рослини необхідними ресурсами. Визначення параметрів ґрунту дозволяє фермерам та агрономам здійснювати обґрунтовані рішення щодо застосування добрив, поливу, а також ефективно планувати сільськогосподарські роботи, сприяючи підвищенню врожайності та сталому використанню природних ресурсів. Інформація про параметри ґрунту допомагає також у моніторингу змін у довкіллі та адаптації до змін клімату, що є важливим для підтримки сталого розвитку аграрного сектору [32-35].

Окрім цього, точне визначення параметрів ґрунту дозволяє виявляти проблеми, які можуть виникати через ерозію, забруднення чи деградацію ґрунтів, що може негативно вплинути на врожайність і здоров'я рослин. Такий моніторинг є важливим для забезпечення сталого використання земельних ресурсів і мінімізації ризиків для екосистем. Збирання даних про параметри ґрунту в реальному часі також дозволяє більш ефективно реагувати на зміни клімату та адаптувати агротехнічні заходи до конкретних умов на кожному полі. Завдяки новітнім технологіям, таким як кіберфізичні системи та автоматизовані моніторингові платформи, процес визначення параметрів ґрунту стає швидким, точним і доступним, що значно

покращує якість аграрного виробництва і зменшує екологічне навантаження на довкілля [36-40].

Основні параметри ґрунту, що визначають його родючість та здатність підтримувати рослини, включають [41-45]:

1. Вологість ґрунту – кількість води, що міститься в ґрунті, яка є доступною для рослин. Цей параметр критичний для підтримки нормального росту і розвитку рослин, оскільки вода є основним носієм поживних речовин.

2. Температура ґрунту – температура ґрунту впливає на активність мікроорганізмів і ферментів, що визначає швидкість процесів розкладу органічних речовин і засвоєння поживних елементів рослинами.

3. рН ґрунту (кислотність) – рівень кислотності або лужності ґрунту, який визначає доступність мінеральних поживних елементів для рослин. Більшість сільськогосподарських культур росте найкраще при нейтральному рН, хоча деякі з них можуть вимагати кисліших або лужних умов.

4. Електропровідність (ЕС) – показник, що відображає концентрацію розчинених солей у ґрунті. Це може бути важливо для визначення рівня засолення ґрунту, що впливає на його родючість та здатність утримувати вологу.

5. Органічний вміст – кількість органічної речовини в ґрунті, яка складається переважно з гумусу. Органічні сполуки важливі для збереження структури ґрунту, покращення його водо- та повітропроникності, а також для живлення рослин.

6. Текстура ґрунту – співвідношення часток піску, супіску, глини та мулистих часток у ґрунті. Це впливає на водо- і повітропроникність, здатність утримувати вологу та поживні елементи, а також на зручність для обробітку.

Ці параметри є ключовими для визначення стану ґрунту і його здатності підтримувати здоровий ріст рослин. Підтримка оптимальних умов для цих показників дозволяє забезпечити високий рівень врожайності та мінімізувати екологічні ризики.

Основні аспекти визначення параметрів ґрунту включають кілька важливих факторів, які дозволяють отримати точну і повну картину стану ґрунтового

середовища. Вони допомагають оцінити не тільки якість ґрунту, але й ефективно планувати сільськогосподарські роботи [46-49].

Методи вимірювання – для визначення параметрів ґрунту застосовуються різні фізичні, хімічні та біологічні методи. Це може включати використання спеціальних датчиків, лабораторних аналізів і польових вимірювань для оцінки вологи, температури, рН та інших характеристик [50].

Точність і регулярність вимірів – для отримання надійних результатів важливо проводити вимірювання в різних точках поля і на різних глибинах ґрунту. Це дозволяє отримати більш точну інформацію, яка враховує неоднорідність ґрунту і можливі зміни його характеристик [51].

Час і сезонність вимірювань – параметри ґрунту можуть змінюватися в залежності від пори року, погодних умов та агротехнічних заходів, таких як полив чи внесення добрив. Регулярні вимірювання протягом року дозволяють виявити сезонні коливання та вчасно реагувати на зміни в умовах середовища [52].

Інтерпретація даних – зібрані дані потрібно правильно інтерпретувати для ефективного застосування. Це передбачає використання спеціальних програмних засобів для аналізу і порівняння показників, що дозволяє приймати оптимальні агрономічні рішення [53].

Інтеграція з іншими даними – визначення параметрів ґрунту має сенс у контексті інших факторів, таких як погодні умови, культура, тип ґрунту, наявність шкідників і хвороб. Тому важливо враховувати ці аспекти для створення комплексної системи моніторингу, що забезпечує високий рівень ефективності в управлінні сільським господарством [54].

Технічні засоби і системи – використання автоматизованих систем моніторингу, таких як кіберфізичні системи або інтегровані сенсори, робить процес збору і обробки даних більш швидким, точним і доступним. Це дозволяє отримувати результати в реальному часі, що дає змогу оперативно коригувати агротехнічні процеси [55].

Екологічні аспекти – визначення параметрів ґрунту також має важливе значення для збереження екологічної рівноваги. Наприклад, моніторинг рівня кислотності,

електропровідності або органічного вмісту дозволяє виявити проблеми, такі як засолення чи ерозія ґрунтів, що можуть загрожувати екосистемі [56, 57].

Оцінка впливу агротехнічних заходів – важливо регулярно вимірювати параметри ґрунту після проведення агротехнічних операцій, таких як внесення добрив, полив чи обробка землі. Це дозволяє оцінити ефективність застосованих методів та коригувати їх для досягнення оптимальних результатів. Аналіз змін параметрів ґрунту після проведення агротехнічних заходів дає змогу оцінити їх вплив на родючість та здоров'я ґрунту в цілому [58].

Оцінка структури ґрунту – визначення не лише фізичних, а й механічних властивостей ґрунту, таких як пористість, водопроникність і здатність утримувати вологу, є важливим аспектом. Ці характеристики безпосередньо впливають на здатність ґрунту забезпечувати рослини необхідною кількістю води та поживних речовин [59].

Індивідуальні характеристики кожного поля – кожне поле має свої специфічні характеристики ґрунту, такі як тип ґрунту, наявність мікроелементів, рівень органічної речовини та інші фактори. Тому важливо адаптувати методи визначення параметрів ґрунту до умов конкретного поля, щоб максимально точно оцінити його стан [60].

Адаптація до змін клімату – з урахуванням змін клімату важливо проводити моніторинг ґрунту для раннього виявлення можливих змін у його характеристиках, таких як зменшення вологості або зміни кислотності. Це дозволяє своєчасно коригувати агрономічні практики, наприклад, змінюючи стратегії поливу чи вибір культур, які найкраще підходять для нових умов [61, 62].

Використання даних для прогнозування та моделювання – на основі зібраних параметрів ґрунту можна створювати прогностичні моделі, які допомагають у плануванні агрономічних робіт. Це дозволяє передбачати майбутні зміни в ґрунтових умовах, що особливо важливо для розробки довгострокових стратегій управління земельними ресурсами [63].

Взаємодія з іншими елементами агросистеми – визначення параметрів ґрунту повинно бути інтегровано в загальну систему управління сільським господарством.

Це дозволяє поєднувати дані про ґрунт з інформацією про погоду, стан культур, використання добрив та засобів захисту рослин для максимальної ефективності агропрактик [64].

Мінімізація екологічного впливу – за допомогою точного визначення параметрів ґрунту можна значно зменшити екологічний вплив сільськогосподарських практик. Це досягається через оптимізацію використання води, зменшення витрат добрив та запобігання деградації ґрунтів, що сприяє збереженню екосистем і природних ресурсів [65].

Ці аспекти є основою для ефективного моніторингу та управління станом ґрунтів, що веде до підвищення врожайності, збереження ресурсів і зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Отже, визначення параметрів ґрунту є комплексним процесом, що охоплює різноманітні аспекти – від точності вимірювань і інтерпретації даних до адаптації агрономічних практик і збереження екології. Усі ці фактори взаємодіють між собою і забезпечують сталий розвиток сільськогосподарського виробництва, підвищення врожайності та збереження природних ресурсів [66, 67].

Визначення параметрів ґрунту є важливим з кількох причин, оскільки ці показники безпосередньо впливають на здоров'я рослин, врожайність, екологічний стан і ефективність аграрних практик [68].

По-перше, знання параметрів ґрунту, таких як вологість, рН, температура та структура, дозволяє правильно вибирати сільськогосподарські культури для конкретних умов, що сприяє їх здоровому росту і високим урожаєм. Наприклад, деякі культури потребують більш кислих ґрунтів, тоді як інші віддають перевагу нейтральному рН. Таким чином, точне визначення параметрів ґрунту дозволяє зберегти ресурси та підвищити ефективність сільського господарства [69, 70].

Визначення цих параметрів допомагає виявляти проблеми з ґрунтом, такі як засолення, ерозія чи виснаження. Якщо ґрунт не має оптимальних умов для росту рослин, це може призвести до зниження родючості та в кінцевому підсумку — до зниження врожайності. Вчасне виявлення таких проблем дозволяє вжити заходів для відновлення ґрунту, таких як використання органічних добрив або коригування рН.

Точне визначення параметрів ґрунту є необхідним для мінімізації екологічних ризиків. Наприклад, неправильне внесення добрив або полив можуть призвести до забруднення водних ресурсів або погіршення якості ґрунтів через надлишкову кислотність або засолення. Регулярний моніторинг параметрів ґрунту дозволяє коригувати агротехнічні заходи, щоб уникнути негативних наслідків для навколишнього середовища [71-73].

Дані про параметри ґрунту використовуються для прогнозування і адаптації до змін клімату. Зміни температури, вологості та інших умов можуть суттєво впливати на якість ґрунту. Моніторинг цих параметрів дозволяє сільським господарствам швидко адаптуватися до нових умов і застосовувати ефективні стратегії управління.

Вивчення параметрів ґрунту дозволяє забезпечити ефективне використання ресурсів, таких як вода та добрива. Знання про вологість, рН, органічний вміст та інші властивості ґрунту допомагає оптимізувати використання води, особливо в умовах обмежених водних ресурсів або в посушливих районах. Це дозволяє знизити витрати на полив і зберегти воду, що є важливим чинником в аграрних регіонах, де з водними ресурсами є проблема [74-77].

Точне визначення параметрів ґрунту допомагає в запобіганні деградації ґрунтів, зокрема в результаті ерозії або засолення. Якщо ці параметри постійно моніторяться, можна своєчасно виявити зміни, які можуть привести до погіршення якості ґрунту, і вжити необхідних заходів для їх усунення. Це включає, наприклад, використання агрономічних заходів, таких як посів трав для боротьби з ерозією або зміна технології обробітку землі [78-80].

Визначення параметрів ґрунту допомагає планувати сільськогосподарські роботи на довгострокову перспективу, базуючись на точних і надійних даних. Це дає змогу планувати обробку ґрунту, внесення добрив та вибір культур залежно від стану ґрунту в конкретний момент часу. Таке планування дозволяє уникнути помилок, які можуть призвести до зниження продуктивності або навіть до пошкодження ґрунту.

Наукові дослідження та розвиток технологій для визначення параметрів ґрунту дозволяють створювати більш інтелектуальні і автоматизовані системи моніторингу, що значно полегшують роботу агрономів. Ці системи здатні надавати інформацію в

реальному часі, що дозволяє приймати миттєві рішення і адаптувати агротехнічні заходи відповідно до змін у ґрунті, погодних умовах чи інші важливі фактори [81-83].

Визначення параметрів ґрунту є важливим для забезпечення біологічного балансу в аграрних екосистемах. Наприклад, правильний рівень рН ґрунту сприяє нормальному розвитку корисних мікроорганізмів, які підтримують родючість ґрунту. Моніторинг цих параметрів дозволяє створювати сприятливі умови для біологічних процесів, що допомагає зберегти здоров'я ґрунту і підвищити його родючість без надмірного використання хімічних добрив [84, 85].

У підсумку, визначення параметрів ґрунту є важливою складовою стратегії сталого сільського господарства. Це дозволяє не тільки покращити ефективність агрономічних практик, але й сприяє збереженню природних ресурсів, зниженню екологічних ризиків і адаптації до змін клімату, що є основою для забезпечення продовольчої безпеки та збереження екологічного балансу.

Визначення параметрів ґрунту є важливим для забезпечення сталого розвитку сільського господарства, підвищення ефективності виробництва та збереження природних ресурсів, що сприяє не тільки економічному, але й екологічному благополуччю.

1.3 Висновки. Постановка задачі

Актуальність кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту в Україні визначається кількома важливими факторами, зокрема змінами клімату, зменшенням родючості ґрунтів та необхідністю впровадження ефективних технологій для забезпечення сталого сільського господарства. В Україні, де значна частина економіки залежить від аграрного сектора, точний моніторинг стану ґрунту є ключовим аспектом для підвищення ефективності сільського виробництва, оптимізації використання водних та земельних ресурсів і зменшення витрат на добрива та пестициди. Кіберфізичні системи можуть забезпечити своєчасний збір даних про вологість, температуру, рівень рН та інші критичні параметри ґрунту, що дозволить фермерам оперативно реагувати на зміни в умовах навколишнього

середовища. Завдяки таким системам можна зменшити негативний вплив надмірного поливу, оптимізувати використання водних ресурсів, що є особливо важливим в умовах посухи, що все частіше виникає в Україні через зміни клімату.

Ці системи також дозволяють отримувати точні прогнози щодо врожайності та стану ґрунту, а також розробляти індивідуальні рекомендації для кожного поля чи ділянки. Оскільки в Україні існує велика різноманітність кліматичних умов та типів ґрунтів, кіберфізичні системи здатні адаптуватися до різних аграрних потреб, що робить їх надзвичайно корисними для розвитку точного землеробства.

Впровадження таких технологій допомагає не тільки зберігати природні ресурси, але й покращити економічну ефективність сільського господарства. Тому розробка та впровадження кіберфізичних систем для моніторингу ґрунтів є надзвичайно важливим кроком для сталого розвитку аграрного сектору України. Відтак наше дослідження присвячене розробленню методу та кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту.

Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних *задач*:

- 1) аналіз відомих методів та рішень для визначення параметрів ґрунту;
- 2) моделювання процесу визначення параметрів ґрунту;
- 3) розроблення методу збору, моніторингу та керування даними для визначення параметрів ґрунту;
- 4) розроблення архітектури кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту;
- 5) проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

Об'єктом дослідження є процес визначення параметрів ґрунту. Предметом дослідження є метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту.

2 ВИБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ

2.1 Вибір датчиків для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту – 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. Така система є важливою складовою сучасного «розумного» землеробства, екологічного моніторингу та сталого використання природних ресурсів.

Взагалі, кіберфізична система складається з трьох рівнів – нижнього, середнього і верхнього. Нижній рівень – це рівень датчиків. Середній рівень – це рівень контролера, до якого приєднуються датчики. Верхній рівень – це система збору, моніторингу та керування даними кіберфізичної системи в реальному часі. Отже, для побудови кіберфізичної системи слід виконати вибір датчиків для формування нижнього рівня, вибір контролера для формування середнього рівня та розробити сценарії і алгоритм збору, моніторингу та керування даними для формування верхнього рівня. Крім цього, слід обрати спосіб та стандарт передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами усіх трьох рівнів.

Основними параметрами, які буде визначати розроблювана кіберфізична система, будуть: вологість ґрунту, температура ґрунту, електрична провідність ґрунту, кислотність (pH) ґрунту, вміст поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстура (щільність) ґрунту.

Для вимірювання вологості ґрунту використовуються такі датчики:

1) ємнісні датчики (capacitive soil moisture sensors), які вимірюють зміну діелектричної проникності ґрунту – чим більше води, тим вища ємність; їх перевагами є точність та стабільність, нечутливість до солей, довговічність; популярні моделі – DFROBOT Capacitive Sensor, SEN0193;

2) резистивні датчики (resistive soil moisture sensors), які базуються на зміні електричного опору між двома електродами, що залежить від вологості; їх перевагами є низька вартість та простота використання, а недоліками є менша точність та швидше зношування через корозію; популярна модель – YL-69;

3) тензометричні датчики (tensiometers), які вимірюють тиск, який рослини мають прикласти, щоб поглинути воду з ґрунту; їх перевагами є точність (навіть при високій вологості) та прийнятність для сільськогосподарських потреб; недоліками є менша ефективність при сухому ґрунті та потреба у обслуговуванні;

4) гравіметричні датчики (gravimetric method), які визначають вологість шляхом зважування зразків до та після висушування; найточніші, але непридатні для автоматичного моніторингу, використовуються тільки в лабораторіях;

5) датчики з використанням Time Domain Reflectometry (TDR), які вимірюють час проходження електромагнітної хвилі через ґрунт; їх перевагами є висока точність та робота в широкому діапазоні типів ґрунту; недоліком є висока вартість; популярні моделі – Decagon 5TE, Campbell Scientific CS616.

Порівняльний аналіз популярних датчиків вологості ґрунту представлений в Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз популярних датчиків вологості ґрунту

Модель	Тип	Точність	Живлення	Інтерфейс	Довговічність	Ціна, USD	Призначення
YL-69	Резистивний	Низька (± 10 – 15%)	3.3– 5V	Аналоговий + цифровий	Низька (до 6 міс)	1-3	Початкове навчання, аматорські проекти. Вимірює лише вологість

Кінець таблиці 2.1

DFROBOT SEN0193	Ємні сний	Середня ($\pm 5\%$)	3.3– 5V	Аналого- вий	Висока (1–2 роки)	6-10	Побутове застосу- вання, DIY проекти. Вимірює лише вологість
Decagon 5TE	Ємні сний	Висока ($\pm 1-2\%$)	3.6– 15V	SDI-12 / UART	Висока (3+ роки)	200- 250	Професій- ний. Вимірює вологість, темпера- туру та електро- провід- ність ґрунту.
TDR Campbell CS616	TDR	Дуже висока ($\pm 1\%$)	5–18V	TTL / RS- 232	Висока (5+ років)	300- 400	Наукові, інженерні системи. Вимірює вологість та діелект- ричну проник- ність ґрунту

Очевидно, що 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*.

Порівняльний аналіз поширених датчиків вимірювання кислотності (pH) ґрунту представлений у Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз поширених датчиків вимірювання кислотності (pH) ґрунту

Модель	Тип	Діапазон pH	Точність	Інтерфейс	Ціна, USD	Особливості
DFRobot Gravity pH Sensor	Гальванічний електрод	0 – 14	$\pm 0.1 - 0.2$	Analog, BNC	30- 50	Потрібне калібрування; зонд змінний. Вимірює тільки кислотність ґрунту
Atlas Scientific pH Sensor	Лабораторний електрод	0 – 14	$\pm 0.002 - 0.01$	UART / I2C / Analog	70- 150	Дуже точний; підтримка калібрування. Вимірює тільки кислотність ґрунту
SEN0161 (DFRobot v1.1)	Аналоговий pH датчик	0 – 14	$\pm 0.1 - 0.2$	Analog	20- 35	Бюджетний, підходить для Arduino. Вимірює

Кінець таблиці 2.2

						кислотність та температуру грунту
Vernier Soil pH Sensor	Професійний (пробовий)	2 – 10	± 0.2	Аналог, сумісний з LoggerPro	100- 150	Стабільний для тривалого моніторингу. Вимірює тільки кислотність грунту
Hanna HI99121	Портативний вимірювач	0 – 14	± 0.02	Ручний, цифровий дисплей	300- 500	Польовий рН-метр з вбудованим зондом. Вимірює кислотність та температуру грунту
Bluelab Soil pH Pen	Портативний	3 – 9	± 0.1	Ручний	100- 120	Легкий у використанні, з дисплеєм. Вимірює кислотність, температуру грунту

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо портативний датчик *Bluelab Soil pH Pen* для вимірювання кислотності ґрунту.

Порівняльний аналіз різних датчиків для вимірювання вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій), органічних речовин і мінералів в ґрунті представлений в Таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняльний аналіз різних датчиків для вимірювання вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій), органічних речовин і мінералів в ґрунті

Модель	Параметри вимірювання	Діапазон вимірювання	Тип вимірюваних речовин	Ціна, USD	Особливості
ECOFUEL Soil Nutrient Sensor	Азот (N), фосфор (P), калій (K), органічні речовини, мінерали	Азот: 0–150 ppm, Фосфор: 0–50 ppm, Калій: 0–250 ppm	Поживні елементи, органічні речовини	500-700	Інтерфейс: Bluetooth, застосовується для агрономії, садівництва
METER Group HydroSense	Азот, фосфор, калій, вологість, температура ґрунту	Варіюється залежно від конкретних датчиків	Поживні елементи, вологість ґрунту	600-900	Інтерактивна система для моніторингу водного балансу
LusterLeaf 1601 (Soil Test Kit)	Азот, фосфор, калій	Варіюється залежно від тесту (різні діапазони)	Азот, фосфор, калій	40-60	Можливість домашнього використання, ручні набори для аналізу

Кінець таблиці 2.3

Hanna Instruments HI83200	Азот, фосфор, калій, кальцій, магній, залізо та інші	Відповідно до тестів, від кількох ppm до г/л	Поживні елементи, мінерали	300- 500	Мультиметр, підтримує різні методи тестування
SoilOptix	Азот, фосфор, калій, кальцій, магній, органічні речовини	Варіативний, в залежності від типу грунту	Поживні елементи, органічні речовини	5000- 10000	Використовує спектроскопію для аналізу грунту
Bluelab Soil pH Pen (v2)	pH ґрунту, температура ґрунту, вологість (азот, фосфор, калій)	pH: 0–14, Температура: -5 до 60°C	pH ґрунту, температура ґрунту	100- 150	Портативний, швидке вимірювання, ідеальний для польових умов
Yara N- Tester	Азот (N)	0–250 ppm азоту в ґрунті	Азот	200- 300	Портативний, застосовується для швидкої перевірки вмісту азоту

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик *ECOFUEL Soil Nutrient Sensor*,

який пропонує найбільш точне вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали, і має відносно невисоку вартість.

Порівняльний аналіз різних датчиків для вимірювання текстури (щільності) ґрунту представлений в Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Порівняльний аналіз різних датчиків для вимірювання текстури (щільності) ґрунту

Модель	Параметри вимірювання	Діапазон вимірювання	Тип вимірюваних речовин	Ціна, USD	Особливості
Eijkelkamp Soil Moisture Sensor	Вологість ґрунту, щільність ґрунту	Вологість: 0–100%, Щільність ґрунту: 1–2 g/cm ³	Вологість, щільність ґрунту	300-600	Підходить для досліджень, що вимагають точних вимірювань
Campbell Scientific CS655	Вологість ґрунту, температура ґрунту, текстура ґрунту	Вологість: 0–100%, Температура: -40°C до 50°C	Вологість, температура, текстура	500-800	Використовується для довгострокових спостережень за ґрунтом
Veris Technologies 3100	Вологість ґрунту, електрична провідність, текстура ґрунту	Вологість: 0–100%, EC: 0–10 dS/m	Вологість, текстура, EC ґрунту	5000-10000	Мобільний моніторинг, використовується в польових умовах

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик *Eijkelkamp Soil Moisture*

Sensor, який вимірює не тільки вологість ґрунту, але й щільність ґрунту, що є важливим параметром для оцінки структури ґрунту, і має відносно невисоку ціну.

Розглянемо детально обрані датчики.

Датчик *Decagon 5TE* є одним із популярних пристроїв, що використовуються для вимірювання параметрів ґрунту, таких як вологість, температура та електропровідність. 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 (ЕС) 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. 2.1) 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.

Датчик Decagon 5TE має низку додаткових переваг, які роблять його надзвичайно корисним для агрономів та дослідників. Його конструкція дозволяє здійснювати вимірювання в різних типах ґрунтів, від глинистих до піщаних, завдяки високій точності сенсорів. Завдяки своїй здатності до швидкого і точного збору даних, цей датчик особливо ефективний у проектуванні систем точного землеробства, де критично важливо отримувати своєчасну інформацію про стан ґрунту для прийняття оперативних рішень.



Рис. 2.1 – Датчик Decagon 5TE для вимірювання вологості, температури та електропровідності ґрунту

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. Це забезпечує стійкість та надійність в експлуатації навіть в умовах важких погодних умов або в екстремальних температурах.

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.

Ще однією перевагою є можливість інтеграції датчика 5TE з різними системами моніторингу і контролю, що дозволяє віддалено отримувати дані через Wi-Fi або інші бездротові технології. Це значно полегшує роботу фермерам і дослідникам, які можуть відслідковувати параметри ґрунту без необхідності бути

безпосередньо на місці. Інтерфейс датчика також дозволяє його інтеграцію з іншими сільськогосподарськими технологіями, такими як системи автоматизованого поливу, що підвищує ефективність і точність агрономічних заходів.

Завдяки такій багатофункціональності, Decagon 5TE забезпечує комплексний підхід до моніторингу стану ґрунту, що дозволяє приймати ефективні та науково обґрунтовані рішення щодо управління сільськогосподарськими процесами.

Датчик Bluelab Soil pH Pen – це 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. Він має функцію автоматичної температурної компенсації, що дозволяє отримувати точні результати незалежно від температури середовища. Дисплей з підсвічуванням забезпечує зручне зчитування показників навіть у умовах низької освітленості.

Bluelab Soil pH Pen також має функцію автоматичного вимкнення для економії енергії та індикатор низького заряду батареї. Прилад повністю водонепроникний, що дозволяє використовувати його в різних умовах без ризику пошкодження. Він також оснащений вбудованим калібрувальним розчином та інструментом для калібрування, що забезпечує точність вимірювань.

Для підтримки точності приладу рекомендується проводити його калібрування після кожного очищення та принаймні раз на місяць. У разі висихання електрода, його можна відновити, замочивши в розчині протягом 24 годин.

Завдяки своїй точності, зручності використання та надійності, датчик Bluelab Soil pH Pen (рис. 2.2) є відмінним вибором для тих, хто прагне забезпечити оптимальні умови для росту рослин через точний моніторинг pH та температури ґрунту.

Датчик Bluelab Soil pH Pen є високоякісним інструментом для визначення pH ґрунту, що дозволяє фермерам, садівникам та агрономам отримувати точні та

швидкі результати вимірювань кислотності ґрунту. Це надзвичайно важливо для правильного управління родючістю ґрунту, оскільки рН впливає на доступність поживних елементів для рослин і їх здатність до поглинання цих елементів.

Цей датчик має простий і зручний дизайн, який дозволяє легко проводити вимірювання в польових умовах або на лабораторному столі. Висока точність вимірювань забезпечується завдяки використанню скляного електрода, який дає чіткі результати навіть при зміні температури ґрунту. Автоматична температурна компенсація допомагає отримати точні дані в умовах, коли температура може коливатися.



Рис. 2.2 – Датчик BlueLab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту

Bluelab Soil pH Pen також вирізняється довговічністю завдяки водонепроникному корпусу, що дозволяє використовувати його в умовах з підвищеною вологістю або навіть в дощову погоду. Це важливо для агрономів, які працюють в полі або на відкритих територіях, де умови можуть бути змінними.

Додатковою перевагою є функція автоматичного вимкнення, що дозволяє зекономити енергію батарей, а також наявність індикатора низького заряду, що дозволяє уникнути непередбачених перерв у вимірюваннях. Калібрування цього датчика є простим і швидким, а для забезпечення його точної роботи важливо регулярно виконувати калібрування за допомогою стандартних калібрувальних розчинів.

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.

Датчик 7-в-1 Soil Nutrient Sensor для 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.

Датчик 7-в-1 Soil Nutrient Sensor – це багатофункціональний інструмент, призначений для вимірювання основних параметрів ґрунту, таких як pH, вологість, температура, електропровідність (EC), а також рівні азоту (N), фосфору (P) та калію (K). Цей пристрій особливо корисний для агрономів, садівників та дослідників, які прагнуть отримати комплексну інформацію про стан ґрунту для оптимізації умов вирощування рослин.

Датчик використовує металеві електроди для визначення рівнів N, P та K, а також для вимірювання інших параметрів ґрунту. Однак важливо зазначити, що точність вимірювань рівнів NPK може бути обмеженою, оскільки ці сенсори часто базуються на вимірюванні електропровідності ґрунту, що може не завжди точно відображати концентрацію окремих поживних елементів. Тому для більш детального та точного аналізу складу ґрунту рекомендується проводити лабораторні дослідження.

Цей датчик 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.

Необхідно враховувати, що для точного визначення рівнів органічних речовин у ґрунті, таких як гумус, цей датчик не призначений. Для отримання детальної інформації про вміст органічних сполук рекомендується використовувати спеціалізовані лабораторні методи аналізу.

Датчик 7-в-1 Soil Nutrient Sensor (рис. 2.3) є корисним інструментом для агрономів, які займаються точним землеробством, а також для садівників та дослідників, які прагнуть оптимізувати умови вирощування рослин шляхом моніторингу основних параметрів ґрунту. Він дозволяє швидко отримати загальну картину стану ґрунту, що сприяє своєчасному прийняттю рішень щодо поливу, внесення добрив та інших агротехнічних заходів.

Цей датчик також може бути корисним для моніторингу здоров'я ґрунту на великих територіях, що є особливо важливим для сільського господарства, де контроль за складом ґрунту безпосередньо впливає на врожайність. Використання датчика 7-в-1 Soil Nutrient Sensor дозволяє здійснювати своєчасну корекцію рівнів поживних елементів, що в свою чергу сприяє більш ефективному використанню добрив та ресурсів, а також зменшує ризик виснаження ґрунту.



Рис. 2.3 – Датчик 7-в-1 Soil Nutrient Sensor для вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали

Оскільки цей сенсор дає змогу вимірювати кілька параметрів одночасно, він дозволяє агрономам швидко отримувати комплексну інформацію про стан ґрунту. Це особливо корисно в умовах, коли потрібно оперативно приймати рішення щодо агротехнічних заходів, таких як коригування рН ґрунту, внесення певних поживних елементів або регулювання вологості для оптимальних умов росту рослин.

Завдяки своїй компактності і простоті використання, 7-в-1 Soil Nutrient Sensor стає чудовим вибором для малих та середніх сільськогосподарських підприємств, а також для дослідницьких організацій, які вивчають взаємодію рослин і ґрунтових умов. Його ефективність дозволяє зберігати час і ресурси, при цьому забезпечуючи надійні результати в реальному часі.

Однак варто враховувати, що, хоча датчик є дуже корисним для швидкого оцінювання загальних умов ґрунту, для більш глибокого аналізу або для специфічних агрономічних завдань можуть бути необхідні додаткові інструменти або лабораторні дослідження для точного визначення органічних речовин чи мінералів у ґрунті.

Датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor (рис. 2.4) спеціалізується на вимірюванні вологості ґрунту, а також на визначенні текстури (щільності) ґрунту. Цей пристрій є важливим інструментом для агрономів і фермерів.



Рис. 2.4 – Датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor для вимірювання текстури (щільності) ґрунту

Щільність ґрунту (або об'ємна маса) є важливим параметром, що впливає на аерацію, водопроникність та здатність коренів до росту. Для її визначення зазвичай використовують методи, які включають відбір проб ґрунту, їх зважування та об'ємне вимірювання, а також спеціалізовані прилади, такі як пенетрометри. Текстура ґрунту визначається розподілом часток різного розміру, таких як пісок, мул та глина, і має значний вплив на водо- та повітропроникність, а також на здатність утримувати поживні речовини.

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.

2.2 Вибір контролеру та стандарту передачі даних для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Для формування середнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту проведено порівняльний аналіз контролерів, результати якого представлені у Таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Порівняльний аналіз контролерів, які можуть бути використані для середнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Контролер	Вхідні порти	Вихідні порти	Протоколи комунікації	Особливості	Ціна, USD
Arduino UNO	14 цифрових, 6 аналогових портів	12 цифрових, 6 аналогових виходів	I2C, SPI, UART	Легкий у використанні, велика	20-30

Продовження таблиці 2.5

				спільнота підтримки, дешевий	
Raspberry Pi 4	40 GPIO пінів, підтримка цифрових та аналогових сигналів	HDMI, USB, GPIO пін, Ethernet	I2C, SPI, UART, Ethernet, Wi- Fi	Потужний, підтримка Linux, великий вибір периферії	35-100
ESP32	34 аналогових цифрових портів, 15 цифрових	34 виходи для сервоприво- дів, LED, сенсорів	Wi-Fi, Bluetooth, I2C, SPI, UART	Вбудований Wi-Fi та Bluetooth, енергоефек- тивний	5-15
BeagleBone Black	69 цифрових/ аналогових портів	GPIO, UART, SPI, I2C, PWM	Ethernet, UART, SPI, I2C, CAN	Потужний, підтримка Linux, багатофункці- ональний	45-60
Intel Edison	20 цифрових пінів, 6	20 цифрових пінів, 6	Wi-Fi, Bluetooth,	Компактний, вбудований	50-80

Кінець таблиці 2.5

	аналогових портів	аналогових виходів	UART, SPI, I2C	Wi-Fi та Bluetooth, для промислових застосувань	
Adafruit Feather M0	20 цифрових пінів, 6 аналогових портів	20 пінів для підключення сенсорів	I2C, SPI, UART	Малий розмір, легкий у використанні, підтримка різних датчиків	20-30
NXP i.MX RT1060	144 пінів для цифрових/ аналогових портів	GPIO, SPI, UART, CAN, Ethernet	I2C, SPI, UART, Ethernet	Висока продуктивніс ть, підходить для складних додатків	60-100

Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо *контролер ESP32*, який є потужним пристроєм з багатьма можливостями підключення, є енергоефективним варіантом, особливо для автономних систем, де важлива низька енергоспоживаність, є чудовим варіантом для бездротових систем з низьким енергоспоживанням, особливо враховуючи його низьку ціну.

ESP32 (рис. 2.5) – 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.

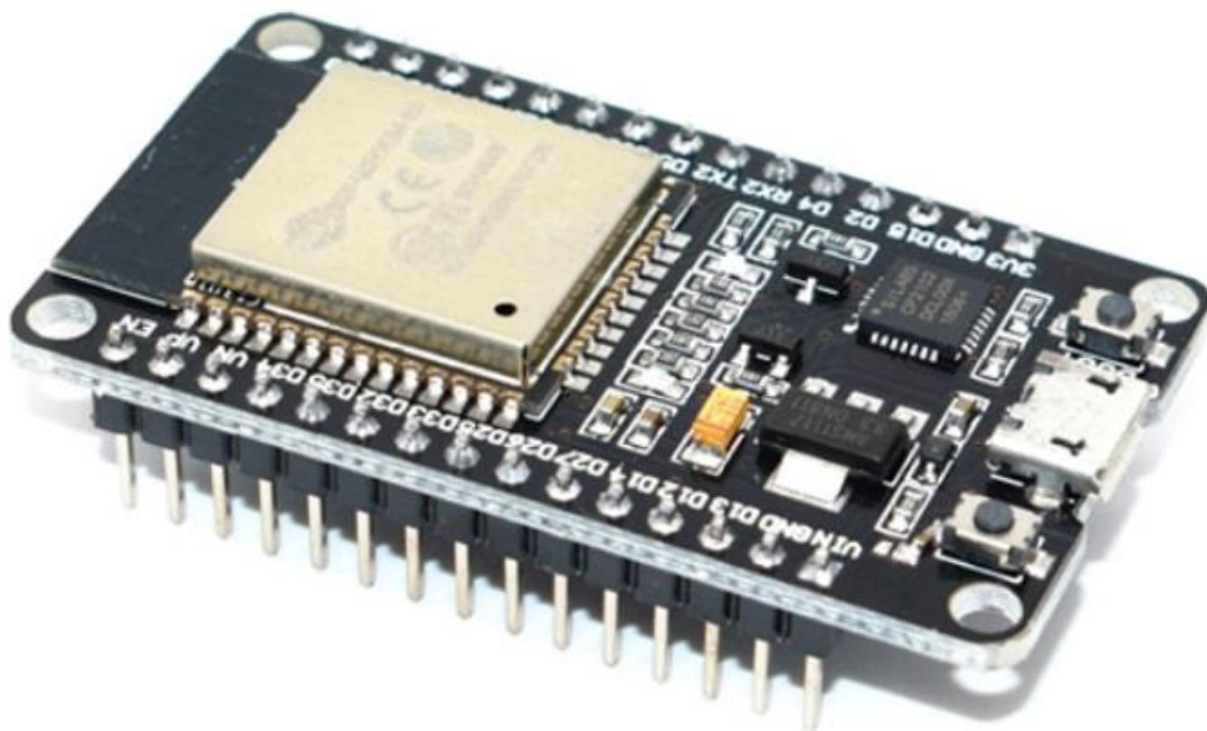


Рис. 2.5 – Контролер ESP32

Основні характеристики ESP32:

1. Двоядерний процесор – ESP32 має два процесорні ядра, що дозволяє виконувати паралельні задачі і підвищує ефективність обробки даних.
2. Wi-Fi та Bluetooth – вбудовані модулі для бездротового з'єднання дозволяють ESP32 підключатися до Інтернету або іншого обладнання для відправлення даних або отримання команд.
3. Велика кількість пінів для підключення сенсорів та актуаторів – завдяки великій кількості виводів, ESP32 може працювати з різними типами датчиків, сервоприводів, актуаторів та іншими периферійними пристроями.

4. Висока потужність обробки – ESP32 підтримує швидкість обробки до 240 МГц і має великий об'єм оперативної пам'яті, що дозволяє працювати з великими масивами даних.

5. Енергоефективність – мікроконтролер має режими низького споживання енергії, що робить його придатним для роботи в автономних системах.

6. Гнучкість та підтримка різних стандартів зв'язку – ESP32 підтримує різні протоколи зв'язку, такі як MQTT, HTTP, WebSocket, що робить його ідеальним для кіберфізичних систем і додатків, де потрібно передавати дані між різними пристроями або на сервери для подальшого аналізу.

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.

ESP32 став дуже популярним завдяки своїй гнучкості та можливостям інтеграції в різноманітні IoT (Інтернет речей) системи. Окрім своїх основних характеристик, таких як двоядерний процесор, підтримка Wi-Fi і Bluetooth, ESP32 також має декілька інших важливих функцій і переваг:

1. Аналогові та цифрові входи/виходи – ESP32 має піновий набір, який дозволяє підключати як аналогові, так і цифрові датчики. Це особливо корисно для систем, де необхідно збирати дані з різних джерел, таких як датчики вологості ґрунту, температури, рН або інші параметри навколишнього середовища.

2. Обробка сигналів та високоякісна обробка аудіо – ESP32 також має можливість обробляти аудіосигнали, що робить його корисним для проектів, які потребують високої якості передачі аудіо, наприклад, в системах моніторингу або для інтеграції з іншими мультимедійними пристроями.

3. Розширене програмне забезпечення та бібліотеки – ESP32 підтримує безліч програмних середовищ для розробки, включаючи Arduino IDE, Espressif IDF (IoT Development Framework) та MicroPython. Це дозволяє розробникам швидко

створювати і налаштовувати додатки та підключати різні типи сенсорів і пристроїв, використовуючи знайомі інструменти.

4. Безпека – ESP32 також підтримує механізми шифрування і аутентифікації, що забезпечує безпеку даних, передаваних через бездротові мережі. Це є важливим аспектом для IoT систем, де захист даних має важливе значення.

5. Легкість інтеграції в хмарні сервіси – завдяки вбудованим можливостям Wi-Fi та Bluetooth, ESP32 легко інтегрується з хмарними сервісами, такими як AWS, Google Cloud, Microsoft Azure, що дає змогу зберігати і аналізувати великі об'єми даних у реальному часі.

Завдяки цим можливостям, ESP32 став відмінним вибором для створення контролерів і розумних пристроїв для моніторингу навколишнього середовища, таких як системи моніторингу ґрунту, сільськогосподарські системи, автоматизовані системи для побутових потреб та промислових застосувань. Мікроконтролер дозволяє не лише отримувати і передавати дані, а й керувати іншими пристроями, що робить його ефективним рішенням для кіберфізичних систем.

Стандартом передачі даних у проєктованій системі оберемо *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.

Wi-Fi (Wireless Fidelity) – це 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.

Основні характеристики стандарту Wi-Fi:

1. Робочі частоти – Wi-Fi зазвичай працює на двох основних частотних діапазонах: 2.4 ГГц і 5 ГГц. Діапазон 2.4 ГГц має більшу дальність покриття, але є

більш схильним до перешкод через велику кількість пристроїв, які використовують цей діапазон. Діапазон 5 ГГц має меншу дальність, але зазвичай пропонує кращу швидкість і менше перешкод.

2. Швидкість передачі даних – залежно від версії стандарту, Wi-Fi може підтримувати різні швидкості передачі даних. Наприклад, стандарт Wi-Fi 4 (802.11n) дозволяє досягати швидкості до 600 Мбіт/с, Wi-Fi 5 (802.11ac) — до 3,5 Гбіт/с, а Wi-Fi 6 (802.11ax) — до 9,6 Гбіт/с.

3. Інтерфейс підключення – Wi-Fi дозволяє пристроям підключатися до мережі бездротовим способом, що забезпечує гнучкість і мобільність. Пристрої, такі як смартфони, ноутбуки, планшети, а також різні пристрої IoT (включаючи датчики для моніторингу ґрунту) можуть підключатися до Wi-Fi-мережі для обміну даними.

4. Безпека – Wi-Fi підтримує різні методи захисту даних, включаючи шифрування WEP (старіший стандарт), WPA (Wi-Fi Protected Access) і WPA2/WPA3, що забезпечує високий рівень захисту переданих даних.

5. Сумісність – Wi-Fi є стандартом, що широко підтримується на більшості сучасних пристроїв, тому воно легко інтегрується з існуючими мережами та обладнанням.

6. Можливості для IoT – Wi-Fi є популярним стандартом для бездротових пристроїв в IoT-системах завдяки своїй доступності, швидкості передачі даних і широкій підтримці. Це дозволяє пристроям, таким як датчики вологості ґрунту або інші агрономічні сенсори, підключатися до централізованих систем для моніторингу та збору даних у реальному часі.

Wi-Fi продовжує розвиватися, з новими стандартами, такими як Wi-Fi 6E, що розширює можливості і забезпечує кращу ефективність у насичених мережах. Завдяки своїм перевагам, Wi-Fi є одним із основних стандартів для бездротових комунікацій, особливо в контексті розумних пристроїв і кіберфізичних систем.

Wi-Fi продовжує залишатися важливим стандартом для бездротової передачі даних завдяки своєму постійному розвитку та вдосконаленню. Є ряд додаткових аспектів, які роблять Wi-Fi важливим у сучасних технологіях.

Підвищена ефективність і масштабованість – стандарт Wi-Fi 6 (802.11ax) був розроблений для покращення ефективності мереж у середовищах з високим навантаженням, таких як багатоквартирні будинки або великі офісні приміщення. Цей стандарт підтримує OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), що дозволяє одночасно передавати дані кільком пристроям, знижуючи затримки і підвищуючи швидкість у мережах з великою кількістю користувачів.

Мала затримка – Wi-Fi дозволяє забезпечити малу затримку при передачі даних, що є важливим аспектом для реального часу в багатьох додатках, включаючи моніторинг ґрунту, сільське господарство, а також для відеоконференцій, ігор або інших чутливих до затримок додатків.

Покращена енергоефективність – Wi-Fi 6 включає в себе функцію Target Wake Time (TWT), яка дозволяє пристроям планувати час для активації і передавання даних, знижуючи потребу в постійній роботі радіомодуля. Це зменшує споживану енергію, що важливо для пристроїв, які працюють на батареях, таких як датчики IoT для моніторингу навколишнього середовища.

Інтеграція з іншими стандартами – Wi-Fi легко інтегрується з іншими бездротовими стандартами, такими як Bluetooth, Zigbee або LoRa, створюючи гібридні рішення для ефективною передачі даних між пристроями в різних сценаріях. У контексті аграрних технологій це дозволяє комбінувати переваги різних бездротових технологій для підключення датчиків, контролерів та інших пристроїв в одну мережу.

Підтримка хмарних технологій – Wi-Fi також є основою для підключення до хмарних платформ, де зберігаються великі об'єми даних, що генеруються від різних пристроїв, таких як датчики моніторингу ґрунту. Це дає змогу зберігати та аналізувати дані на віддалених серверах, а також використовувати потужні обчислювальні ресурси для складних алгоритмів машинного навчання та прогнозування.

Доступність і широка підтримка – Wi-Fi є одним із найбільш поширених бездротових стандартів, що підтримуються майже всіма сучасними пристроями, від смартфонів до мікроконтролерів. Це робить Wi-Fi доступним і зручним

вибором для інтеграції в різні пристрої, а також для забезпечення підключення до Інтернету або внутрішніх мереж.

Завдяки своїм численним перевагам, Wi-Fi є одним з найпопулярніших стандартів для передачі даних у кіберфізичних системах, IoT, а також для бездротових комунікацій у побутових і промислових застосунках. Його розвиток продовжує задовольняти зростаючі вимоги до швидкості, ефективності і надійності мереж, що робить Wi-Fi важливим елементом в еволюції сучасних технологій.

2.3 Висновки

У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування нижнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Очевидно, що 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. Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо портативний датчик BlueLab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту. Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик ECOFUEL Soil Nutrient Sensor, який пропонує найбільш точне вимірювання всіх основних поживних елементів, включаючи органічні речовини та мінерали, і має відносно невисоку вартість. Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor, який вимірює не тільки вологість ґрунту, але й щільність ґрунту, що є важливим параметром для оцінки структури ґрунту, і має відносно невисоку ціну.

Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для формування середнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Враховуючи проведений порівняльний аналіз, для реалізації нашої кіберфізичної системи використовуватимемо контролер ESP32, який є потужним

пристроєм з багатьма можливостями підключення, є енергоефективним варіантом, особливо для автономних систем, де важлива низька енергоспоживаність, є чудовим варіантом для бездротових систем з низьким енергоспоживанням, особливо враховуючи його низьку ціну.

Також у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір стандарту для передачі даних для налагодження зв'язку між компонентами всіх трьох рівнів кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Стандартом передачі даних у проєктованій системі оберемо 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.

3 МЕТОД ТА АЛГОРИТМ ЗБОРУ, МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ ДАНИМИ ДЛЯ ВЕРХНЬОГО РІВНЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ

3.1 Метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Збір, моніторинг та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту є основою для ефективного управління сільськогосподарськими процесами. Збір даних починається на нижньому рівні, де датчики вимірюють різноманітні параметри ґрунту, такі як вологість, температура, рН 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 веб-додаток або мобільна платформа, 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.

Таким чином, верхній рівень кіберфізичної системи відповідає за інтеграцію даних, їх обробку, візуалізацію і автоматичне керування процесами на основі отриманої інформації, що дозволяє досягати високих результатів у аграрному секторі.

Подальше вдосконалення верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту включає інтеграцію із зовнішніми даними, такими як прогнози погоди, стан навколишнього середовища та специфічні інші агрономічні фактори. Ця інтеграція дозволяє створювати більш точні прогнози щодо потреб ґрунту у воді, добривах та інших агрономічних заходах, що допомагає агрономам приймати своєчасні рішення, базуючись на комплексній картині. Збір додаткових даних з таких джерел допомагає покращити точність моніторингу та налаштування систем, а також адаптувати стратегії керування для кожного конкретного поля або ділянки на основі її унікальних характеристик.

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.

Для більш ефективного керування даними необхідно також враховувати можливість обробки великих обсягів інформації, що виникає в результаті збирання даних з численних датчиків на великих площах. В цьому випадку важливою є здатність системи до швидкої обробки та передачі даних без значних затримок, що є важливим для забезпечення своєчасного реагування на зміни умов ґрунту. Кіберфізичні системи можуть використовувати хмарні технології для зберігання і обробки великих обсягів інформації, що дозволяє легко масштабувати систему при необхідності.

Таким чином, верхній рівень кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту має на меті не лише моніторинг і збір даних, але й їх інтеграцію в ширший контекст агрономічного управління, щоб забезпечити точне, адаптивне і надійне управління ґрунтовими ресурсами. Система дозволяє досягати значних знижок у витратах на добрива, воду та інші ресурси, при цьому підвищуючи ефективність вирощування рослин і зберігання здоров'я ґрунтів на довгострокову перспективу.

Збір, моніторинг та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту є критично важливими для забезпечення

ефективного управління сільськогосподарськими процесами, підтримання здоров'я ґрунту і підвищення врожайності. Ось як ці етапи можуть бути реалізовані на верхньому рівні кіберфізичної системи.

Збір даних – на верхньому рівні кіберфізичної системи дані, що отримуються від датчиків на нижньому рівні (які вимірюють такі параметри, як вологість ґрунту, температура, рН, електропровідність та рівень поживних речовин), збираються через контролери (наприклад, ESP32). Ці пристрої отримують сигнали від датчиків, обробляють їх та передають до системи збору даних або на сервери для подальшої обробки.

Моніторинг даних – після збору дані передаються до централізованої платформи для моніторингу. Це може бути програмне забезпечення, яке забезпечує візуалізацію даних у вигляді графіків, таблиць або інтерактивних панелей. Оператори або агрономи можуть в реальному часі переглядати зміни в параметрах ґрунту, таких як рівень вологості, температура, кислотність, щоб оперативно реагувати на будь-які зміни. Відображення в реальному часі дозволяє відслідковувати стан ґрунту, а також прогнозувати можливі проблеми, як-от засуха або надмірна вологість, що можуть вплинути на врожай.

Аналіз даних – дані, зібрані в реальному часі, можуть бути оброблені за допомогою алгоритмів машинного навчання або статистичних методів для виявлення патернів або аномалій у параметрах ґрунту. Це дозволяє передбачити майбутні зміни в умовах ґрунту, оптимізувати використання ресурсів і прогнозувати потреби у додаткових внесеннях добрив чи води. Алгоритми можуть також включати елементи прогнозування врожайності та рекомендацій для покращення ґрунтових умов.

Керування даними – платформи для керування даними дозволяють автоматизувати процеси управління ґрунтовими параметрами. Наприклад, на основі моніторингу вологості ґрунту можна автоматично регулювати систему зрошення або запускати систему внесення добрив, щоб підтримувати оптимальні умови для росту рослин. Керування даними також включає створення звітів і

документування, що важливо для аналізу результатів і прийняття рішень на основі довгострокових спостережень.

Інтерфейс користувача (UI/UX) – для ефективного управління всіма параметрами на верхньому рівні потрібен зручний інтерфейс користувача. Інтерфейс може бути доступний через веб-додатки або мобільні додатки, що дозволяють користувачам (фермерам, агрономам або технічним фахівцям) легко отримувати доступ до інформації про стан ґрунту, налаштовувати системи або вносити корективи у реальному часі. Усі дані можуть бути інтегровані в єдину панель моніторингу, що спрощує прийняття рішень.

Інтеграція з іншими системами – важливою частиною верхнього рівня кіберфізичної системи є інтеграція з іншими інформаційними системами, такими як платформи управління фермерським господарством, погодними станціями, системами управління водними ресурсами та іншими технологіями IoT. Це дозволяє синхронізувати дані та розширювати можливості для аналізу, управління і прогнозування, що підвищує ефективність роботи агрономів і фермерів.

Загалом, верхній рівень кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту об'єднує всі етапи – від збору і моніторингу даних до прийняття рішень і автоматичного керування процесами. Це створює зручну і ефективну платформу для управління аграрними ресурсами, зниження витрат і підвищення врожайності через точне й оперативне управління параметрами ґрунту.

Метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту включає кілька основних етапів:

- 1) ініціалізація системи – завантаження конфігурації (зчитування параметрів налаштувань з бази даних або конфігураційного файлу: інтервали збору даних, типи сенсорів, параметри моніторингу, порогові значення для сигналів тривоги); підключення до контролерів середнього рівня (перевірка зв'язку із середнім рівнем (контролерами) через протокол Wi-Fi, визначення, чи всі датчики правильно підключені); перевірка працездатності датчиків (ініціалізація всіх датчиків і

перевірка їх працездатності, перевірка, чи дані зчитуються коректно і чи відсутні помилки);

2) збір даних з датчиків – опитування сенсорів (контролер здійснює регулярне опитування датчиків на нижньому рівні); збір даних (датчики передають свої показники на середній рівень через протокол Wi-Fi); перевірка якості даних (перед тим, як передавати дані на верхній рівень, система перевіряє правильність отриманих значень);

3) обробка даних на середньому рівні – фільтрація та обробка (отримані дані можуть бути попередньо оброблені на середньому рівні); миттєвий аналіз (оцінка зібраних даних для виявлення аномалій, таких як високий рівень вологості або аномальні температури, і створення попереджень для верхнього рівня); передача результатів на верхній рівень (дані передаються в центральну систему збору даних (верхній рівень) для подальшої обробки);

4) моніторинг та візуалізація на верхньому рівні – збір та збереження даних (датчики передають свої показники на сервер або центральну систему моніторингу; дані зберігаються у базі даних для подальшого аналізу та звітності); візуалізація (на веб-інтерфейсі чи мобільному додатку створюються графіки та діаграми для представлення даних; можливість переглядати історичні дані та аналізувати тенденції за різні періоди); моніторинг у реальному часі (система на верхньому рівні забезпечує відображення даних у реальному часі для користувачів або операторів, це може бути відображення у вигляді інтерактивних панелей або інтерфейсів, що оновлюються автоматично);

5) аналіз та прийняття рішень – виявлення аномалій та порогових значень (на основі зібраних даних система може застосовувати алгоритми для виявлення аномалій або порогових значень, наприклад, коли температура ґрунту перевищує задану норму; якщо параметри виходять за межі безпечних значень, система повинна надсилати сигнал тривоги (попередження через SMS, електронну пошту або інтерфейс)); алгоритми керування (коли система виявляє, що параметри виходять за межі норми, вона може автоматично запускати певні дії); підтримка рішень на основі штучного інтелекту (якщо потрібно, система може

використовувати алгоритми машинного навчання або штучного інтелекту для прогнозування змін параметрів і рекомендацій для дій);

6) інтерфейс для користувача – управління (користувачі можуть вручну керувати системою через веб-інтерфейс або мобільний додаток, змінюючи налаштування, порогові значення та активуючи або вимикаючи певні пристрої; може бути інтеграція з голосовими помічниками); аналіз даних (можливість створення звітів на основі зібраних даних, наприклад, для виведення прогнозів або планування ресурсів; доступ до історичних даних для перегляду змін і трендів протягом часу);

7) автоматизоване реагування на події – автоматичне коригування параметрів (якщо система виявляє негативні тенденції (наприклад, пересихання ґрунту), вона може автоматично активувати необхідні пристрої (системи поливу)); надсилання попереджень (система автоматично відправляє повідомлення (через SMS, email, або інші канали) у разі виявлення критичних подій);

8) аналіз та зберігання результатів – після збору і моніторингу даних можна виконувати статистичний та прогностичний аналіз для вдосконалення роботи системи, а також використовувати історичні дані для визначення найкращих умов роботи або вдосконалення моделі.

Пропонований метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту дозволяє забезпечити ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

Практичне значення та важливість методу збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту полягає в тому, що цей підхід значно покращує ефективність сільськогосподарських процесів, забезпечуючи точність і своєчасність рішень, що базуються на реальних даних. Завдяки інтеграції даних з різних датчиків, що моніторять параметри ґрунту, таких як вологість, температура, рН, поживні речовини і структура, можна отримувати точну картину стану ґрунту в режимі реального часу.

Цей метод дає змогу агрономам і фермерам швидко реагувати на зміни в умовах ґрунту, оптимізуючи використання ресурсів, таких як вода, добрива та інші агрохімікати. Наприклад, система може автоматично коригувати полив, в залежності від вологості ґрунту, або надавати рекомендації щодо додавання добрив на основі аналізу поживних речовин, що дозволяє знижувати витрати та мінімізувати екологічний вплив.

Крім того, моніторинг даних в реальному часі дозволяє своєчасно виявляти проблеми, такі як нестача води або поживних елементів, а також можливі зміни в кислотності або структурі ґрунту, що можуть негативно впливати на врожайність. Це дозволяє приймати обґрунтовані рішення для корекції ситуації ще до того, як проблема стане критичною.

Важливість цього методу також полягає в здатності підтримувати стійкість сільськогосподарського виробництва. Наприклад, можливість прогнозувати зміни в умовах ґрунту та адаптувати стратегії управління дозволяє підвищити стійкість до екстремальних погодних умов або кліматичних змін, що вкрай важливо в умовах глобальних змін клімату.

Таким чином, метод збору, моніторингу та керування даними на верхньому рівні кіберфізичної системи має велике практичне значення для оптимізації сільськогосподарських процесів, покращення ефективності виробництва, збереження ресурсів і довгострокової стійкості ґрунтів. Він забезпечує підтримку здоров'я ґрунтів і підвищує продуктивність сільського господарства, що є важливим для забезпечення продовольчої безпеки.

Важливість та практичне значення методу збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту полягає також у здатності забезпечити точність прогнозування та підтримку довгострокового здоров'я ґрунтів. Збираючи дані про зміни в параметрах ґрунту протягом часу, система може не лише реагувати на поточні потреби, а й прогнозувати майбутні зміни, що дозволяє ефективніше планувати агрономічні заходи, такі як сівоzmіна, внесення добрив або зрошення.

Окрім того, системи моніторингу ґрунту можуть бути інтегровані з іншими технологіями, такими як безпілотні літальні апарати (дрони) або супутникові знімки, що дає можливість для більш детального і широкомасштабного моніторингу великих земельних площ. Це дозволяє ефективно відслідковувати зміни в стані ґрунту на різних ділянках, що важливо для великих агрогосподарств. За допомогою таких технологій можна отримати точні дані про зміни в структурі ґрунту або про рівень вологості, які можуть мати критичне значення для вибору найбільш підходящих культур для певних ділянок.

Практичне значення цього методу також включає зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Завдяки точному моніторингу та керуванню даними, можна значно знизити використання хімічних добрив і пестицидів, оскільки ці заходи будуть застосовуватися тільки в необхідних випадках, що дозволяє мінімізувати забруднення ґрунту та води. В результаті, система сприяє більш сталому і екологічно чистому сільському господарству.

Важливою складовою є також можливість інтеграції цих систем із платформами для управління сільськогосподарськими підприємствами, що дозволяє автоматизувати процеси та зменшити потребу в людських ресурсах. Наприклад, на основі отриманих даних система може автоматично коригувати режим поливу або вносити рекомендації щодо внесення добрив, що дозволяє зекономити час і ресурси.

Таким чином, метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи має безліч практичних переваг для агрономії та сільського господарства, від підвищення ефективності виробництва до сприяння сталому розвитку та збереженню екологічної рівноваги. Він дозволяє більш точно і швидко реагувати на зміни в умовах ґрунту, знижувати витрати та покращувати продуктивність, що є важливим для забезпечення продовольчої безпеки в умовах змінного клімату.

3.2 Алгоритм збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Алгоритм збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту включає такі кроки:

- 1) ініціалізація системи – завантаження конфігурації, підключення до контролерів середнього рівня, перевірка працездатності датчиків;
- 2) збір даних з датчиків – опитування сенсорів, збір даних, перевірка якості даних;
- 3) обробка даних на середньому рівні – фільтрація та обробка, миттєвий аналіз, передача результатів на верхній рівень;
- 4) моніторинг та візуалізація на верхньому рівні – збір та збереження даних, візуалізація, моніторинг у реальному часі;
- 5) аналіз та прийняття рішень – виявлення аномалій та порогових значень, алгоритми керування, підтримка рішень на основі штучного інтелекту;
- 6) інтерфейс для користувача – управління, аналіз даних;
- 7) автоматизоване реагування на події – автоматичне коригування параметрів, надсилання попереджень;
- 8) аналіз та зберігання результатів – після збору і моніторингу даних можна виконувати аналіз для вдосконалення роботи системи, а також використовувати історичні дані для визначення найкращих умов роботи або вдосконалення моделі.

Алгоритм збору, моніторингу та керування даними у верхньому рівні кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту є важливим інструментом для забезпечення точного та своєчасного отримання інформації про стан ґрунтів. Він дозволяє в реальному часі оцінювати показники, такі як вологість, температура, кислотність чи поживний склад, що є критично важливим для прийняття агрономічних рішень. Такий алгоритм сприяє оптимізації використання ресурсів, зменшенню витрат і запобіганню деградації ґрунту. Крім того, систематизовані та накопичені дані створюють основу для довгострокового планування та сталого землекористування.

Блок-схема узагальненого алгоритму збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту представлена на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Блок-схема узагальненого алгоритму збору, моніторингу та керування даними кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

3.3 Висновки

В розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблений метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, який є ефективним для забезпечення повного, точного та своєчасного збору інформації про стан ґрунтів у режимі реального часу. Цей метод дозволяє значно підвищити ефективність сільськогосподарських процесів завдяки інтеграції даних, які надходять з різних сенсорів і відображають такі параметри, як вологість, температура, кислотність, склад поживних речовин та структура ґрунту. Отримана інформація дає змогу аграріям і фахівцям оперативно реагувати на зміни у стані ґрунту, що сприяє оптимізації використання природних і технічних ресурсів, таких як вода, добрива та агрохімікати, а також знижує рівень впливу на навколишнє середовище. Крім того, цей підхід має важливе значення для довгострокового планування та стійкого розвитку аграрного виробництва, оскільки дозволяє прогнозувати зміни у ґрунтових характеристиках, адаптувати сільськогосподарські стратегії до кліматичних умов і забезпечувати підвищення продуктивності сільського господарства з одночасним збереженням родючості ґрунтів.

Значущість цього методу полягає і в його здатності забезпечувати стабільність та адаптивність сільськогосподарського виробництва. Зокрема, можливість завчасного прогнозування змін у стані ґрунту та відповідне коригування стратегій управління сприяє підвищенню витривалості аграрної системи до несприятливих погодних умов або кліматичних коливань, що є особливо актуальним у контексті глобальних кліматичних змін. Отже, впровадження методу збору, моніторингу та керування даними на верхньому рівні кіберфізичної системи має важливе прикладне значення для вдосконалення сільськогосподарських процесів, підвищення їх ефективності, раціонального використання природних ресурсів та довготривалого збереження родючості ґрунтів. Такий підхід не лише сприяє підтриманню здорового стану ґрунтів, але й позитивно впливає на продуктивність аграрного сектору, що є критично важливим

для забезпечення продовольчої безпеки. Крім того, практична користь цього методу проявляється у здатності забезпечувати точне прогнозування змін у ґрунтових характеристиках, що дозволяє системі не лише оперативно реагувати на поточні виклики, але й планувати майбутні агротехнічні заходи – такі як чергування культур, дозоване внесення добрив або водопостачання – з урахуванням довгострокових потреб і тенденцій.

Отже, використання методу збору, моніторингу та керування даними на верхньому рівні кіберфізичної системи відкриває широкі можливості для застосування в агрономії та сільському господарстві – від підвищення продуктивності виробництва до підтримки принципів сталого розвитку та збереження екологічної стабільності. Такий метод забезпечує більш оперативну та точну реакцію на зміни у стані ґрунту, сприяє оптимізації витрат і покращенню ефективності господарювання, що має особливе значення для підтримання продовольчої безпеки в умовах зростаючої кліматичної нестабільності.

Крім цього, в розділі 3 кваліфікаційної роботи розроблено також алгоритм збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, який також є корисним для підвищення точності аграрних рішень (автоматизований збір та аналіз даних про вологість, кислотність, температуру, структуру та склад ґрунту дозволяє аграріям приймати більш обґрунтовані рішення щодо посіву, зрошення, удобрення тощо), реального моніторингу стану ґрунту (система забезпечує безперервне спостереження за станом ґрунту в режимі реального часу, що дозволяє оперативно реагувати на зміни або загрози, наприклад, нестачу вологи чи ерозію), оптимізації ресурсів (керування на основі даних дозволяє ефективно використовувати воду, добрива та паливо, зменшуючи витрати та екологічне навантаження), підтримки довгострокового планування (накопичення та аналіз історичних даних допомагають формувати довгострокову стратегію землекористування, визначати зони деградації та планувати відновлення ґрунтів).

4 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ

4.1 Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту може бути корисною завдяки здатності забезпечувати постійний і точний моніторинг стану ґрунтів у режимі реального часу, що дозволяє аграріям приймати обґрунтовані та оперативні рішення щодо управління поливом, удобренням і вибором культур. Така система сприяє раціональному використанню ресурсів, зменшенню витрат, збереженню родючості ґрунтів і запобіганню їх деградації. Крім того, вона створює основу для довгострокового планування, дозволяє адаптуватися до кліматичних змін і підтримує продовольчу безпеку завдяки підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва.

Основні елементи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту 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.

Спроекуємо архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту на основі розробленого методу – рис. 4.1.

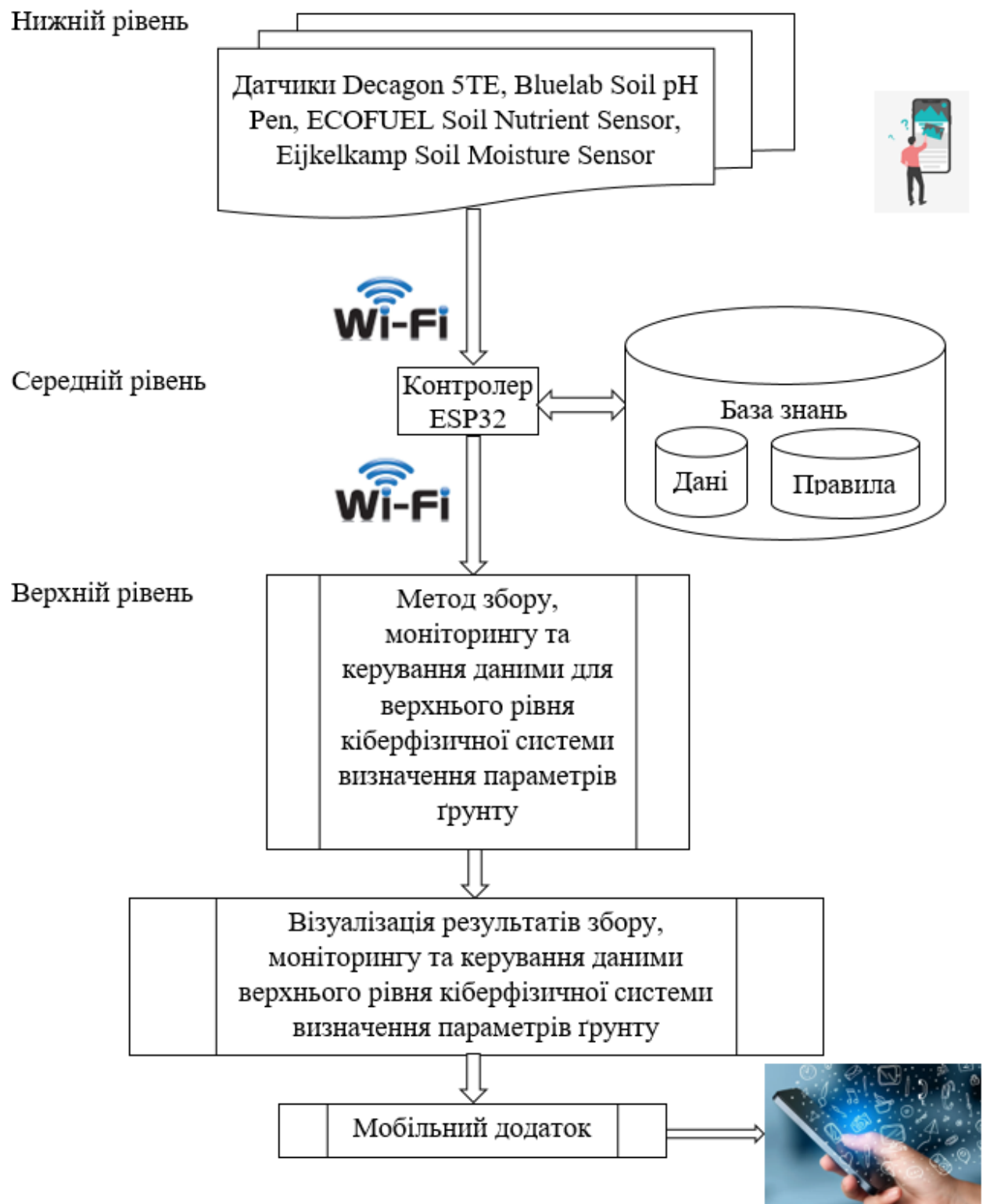


Рисунок 4.1 – Архітектура кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Отже, розроблена кіберфізична система визначення параметрів ґрунту – 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, рН, 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).

Основна мета цієї системи – забезпечення точного моніторингу ґрунтових характеристик з метою покращення аграрного планування, ефективного використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарських угідь. Завдяки можливості своєчасного виявлення змін у стані ґрунту, фермери можуть оперативно приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення, сівозміни та інших агротехнічних заходів. У контексті змін клімату та зростання потреб у продовольчій безпеці, впровадження таких систем стає критично важливим для сталого розвитку аграрного сектору.

До основних переваг та можливостей кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту належать:

1) висока точність і оперативність збору даних – завдяки сучасним датчикам система здатна фіксувати навіть незначні зміни у вологості, температурі, кислотності, електропровідності, структурі ґрунту та вмісті поживних речовин. Це дозволяє аграріям отримувати актуальну інформацію про стан ґрунтів без затримок, що є важливою умовою для прийняття ефективних агротехнічних рішень;

2) автоматизація моніторингу та керування агропроцесами – замість традиційного ручного вимірювання, система забезпечує постійний збір і передачу даних у реальному часі, що дає змогу зменшити людський фактор, скоротити витрати часу та підвищити ефективність аграрної діяльності;

3) оптимізація використання ресурсів – завдяки точному визначенню потреб ґрунту в поливі, добривах чи вапнуванні, система сприяє зменшенню перевитрат

води, добрив та хімічних засобів, що позитивно впливає як на економічні показники, так і на стан навколишнього середовища;

4) адаптація до кліматичних змін – система дозволяє не лише фіксувати поточні умови, а й аналізувати динаміку змін у ґрунті, прогножуючи їхній вплив на врожайність. Це дає змогу заздалегідь коригувати агротехнічні стратегії та зменшувати ризики, пов'язані з екстремальними погодними умовами, посухами чи ерозією;

5) можливість формування історичних баз даних – зібрані з часом дані можуть зберігатися, аналізуватися та використовуватися для стратегічного планування – наприклад, вибору культур для сівозміни, розрахунку потреб у добривах або визначення деградованих ділянок, що потребують відновлення.

Крім того, система може бути інтегрована з іншими цифровими аграрними платформами, включно з ГІС-технологіями, мобільними додатками для агрономів та сервісами супутникового моніторингу, що відкриває широкі можливості для розвитку точного землеробства.

У підсумку, кіберфізична система визначення параметрів ґрунту є важливим інструментом для забезпечення економічної ефективності, екологічної стабільності та сталого розвитку аграрного сектору в умовах сучасних викликів.

Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту має сприятливі умови для вдосконалення та масштабування. З кожним роком з'являються більш точні, енергоефективні та мініатюрні сенсори, які можуть вимірювати все більше параметрів ґрунту з високою точністю. Зменшення вартості таких пристроїв робить систему доступнішою для фермерських господарств різного масштабу. Поширення мереж Wi-Fi, LoRaWAN, 4G/5G дозволяє здійснювати стабільну передачу великих обсягів даних у реальному часі з віддалених ділянок, навіть у сільській місцевості. Це критично важливо для аграрного застосування. Завдяки хмарним платформам можна зберігати, обробляти та аналізувати великі обсяги даних, а алгоритми машинного навчання здатні виявляти закономірності, формувати прогнози та надавати агрономічні рекомендації з високою точністю. У світі зростає попит на раціональне використання ресурсів, мінімізацію втрат і екологічну безпеку

агровиробництва. У цьому контексті кіберфізичні системи відповідають запитам сучасного сільського господарства. Уряди багатьох країн, зокрема України, а також міжнародні програми (наприклад, ЄС, ФАО, Світовий банк) фінансують впровадження цифрових технологій у сільське господарство, включно з системами моніторингу ґрунтів. Ефективне управління станом ґрунтів стає критично важливим для стабільного виробництва продовольства в умовах кліматичних викликів, що стимулює впровадження новітніх технологій моніторингу.

Таким чином, розвиток таких кіберфізичних систем підтримується як внутрішніми технологічними інноваціями, так і зовнішніми соціально-економічними запитами на ефективний та сталий розвиток аграрного сектору.

4.2 Проектування та приклад роботи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Діаграма варіантів використання (Use Case Diagram) кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту ілюструє взаємодію зовнішніх користувачів (акторів) із системою та її ключові функції.

Актори такої системи:

- Аграрій / фермер – основний користувач системи, який використовує її для прийняття рішень щодо сільськогосподарської діяльності.
- Агроном / науковець – може використовувати систему для аналізу даних, моделювання та довгострокового планування.
- Адміністратор системи – відповідає за налаштування та технічну підтримку системи.
- Хмарний сервіс / сервер – не є людиною, але представлений як зовнішня система, що забезпечує зберігання та обробку даних.

Варіанти використання (функції):

- Збір даних із сенсорів – автоматичне отримання інформації з фізичних датчиків у ґрунті.

- Моніторинг параметрів ґрунту в реальному часі – відображення актуальних даних про стан ґрунту.
- Збереження та обробка даних – передача зібраної інформації на сервер або в хмарне сховище.
- Аналіз і прогнозування – створення моделей і прогнозів на основі історичних і поточних даних.
- Надання рекомендацій – формування практичних порад для аграрія щодо поливу, внесення добрив тощо.
- Керування налаштуваннями системи – зміна параметрів системи, оновлення програмного забезпечення, додавання нових користувачів тощо.

Зв'язки та вказані асоціації між акторами і функціями системи демонструють, хто і як взаємодіє з кожною функціональною частиною.

Діаграма варіантів використання кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту (рис. 4.2) показує, що система дозволяє аграріям і фахівцям ефективно збирати, обробляти й використовувати дані про ґрунт для підвищення врожайності, оптимізації ресурсів і довгострокового планування.

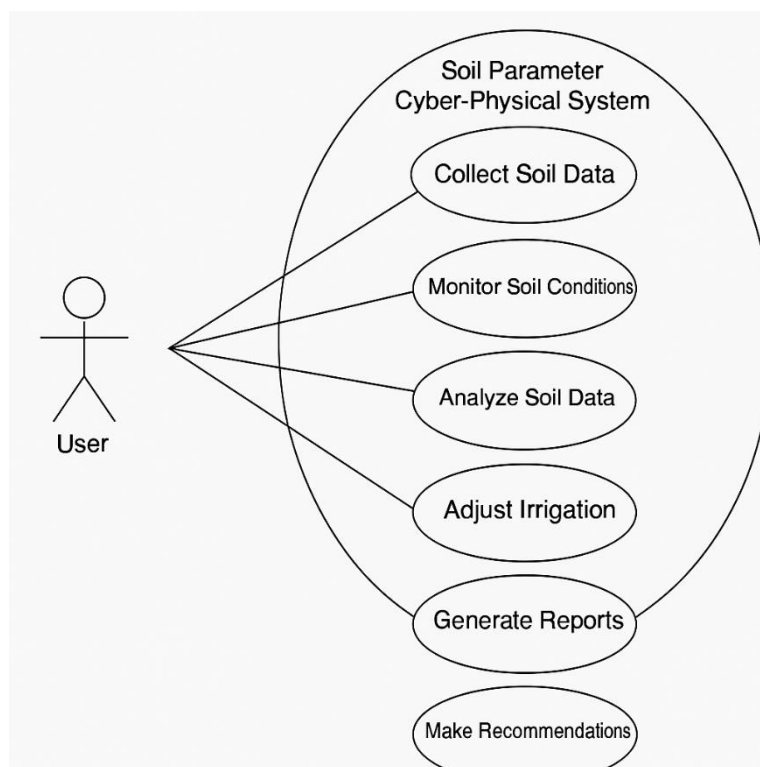


Рисунок 4.2 – Діаграма варіантів використання кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

На діаграмі класів (рис. 4.3) кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту показано основні структурні компоненти системи, їх атрибути, методи та взаємозв'язки між ними. Ключовими перевагами такої діаграми є: чітка модульна структура (легко розширювати систему, додаючи нові типи сенсорів чи користувачів), підтримка реального часу (контролер та сервер дозволяють працювати з даними онлайн), ієрархія та спадкування (демонструє принципи об'єктно-орієнтованого проектування (ООП)).

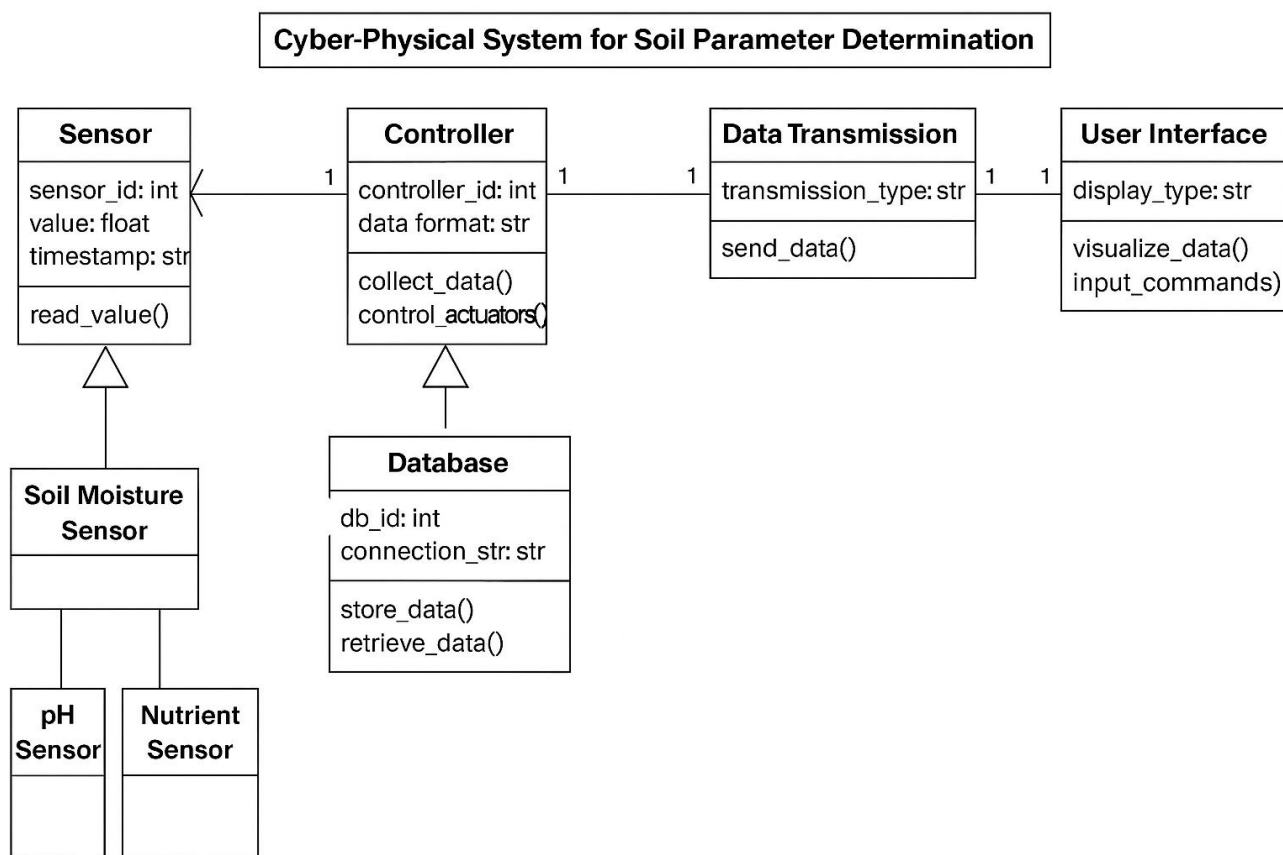


Рисунок 4.3 – Діаграма класів кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Розглянемо приклад роботи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Маємо фермерське господарство, яке вирощує кілька видів овочів на відкритих полях. Для покращення управління поливом і удобренням, а також для моніторингу стану ґрунту, фермер вирішує впровадити кіберфізичну систему, яка використовує датчики для вимірювання різних параметрів ґрунту.

Фермер встановлює датчики Decagon 5TE на кількох точках поля, щоб вимірювати вологість, температуру та електропровідність ґрунту. Ці датчики дають змогу точно визначити рівень вологості ґрунту в кожній точці, що дозволяє оптимізувати полив. Водночас на кількох ділянках землі встановлюються Bluelab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту, що важливо для коректного вибору добрив і забезпечення здоров'я рослин. Для точного визначення вмісту поживних речовин (азот, фосфор, калій) фермер також встановлює ECOFUEL Soil Nutrient Sensor, що дає можливість оперативно коригувати внесення добрив. Для вимірювання щільності ґрунту, що важливо для оцінки аерації та водопроникності, фермер використовує Eijkelkamp Soil Moisture Sensor.

Дані з усіх датчиків збираються і передаються через контролер ESP32. Цей контролер є енергоефективним і підтримує бездротові з'єднання, що дозволяє забезпечити постійний моніторинг стану ґрунту без необхідності прокладати кабелі. За допомогою Wi-Fi стандарту, всі дані передаються на центральний сервер або в хмару для подальшої обробки.

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. Якщо значення параметрів ґрунту знаходяться поза межами оптимальних для вирощування рослин, система видає рекомендації або попередження.

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.

Усі рекомендації та стан ґрунту можуть бути виведені на мобільний додаток або веб-інтерфейс, через який фермер має доступ до даних у реальному часі.

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. В кінцевому результаті, фермер може не лише значно знизити витрати на воду і добрива, але й підвищити врожайність завдяки точному моніторингу та корекції параметрів 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.

4.3 Висновки

В розділі 4 кваліфікаційної роботи розроблено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, яка є інтегрованою технологічною платформою, що об'єднує фізичні датчики, програмне забезпечення, мережеві засоби зв'язку та аналітичні алгоритми для збору, обробки та аналізу даних про стан ґрунту в реальному часі. Система має три рівні: нижній (датчики, що вимірюють фізико-хімічні характеристики, такі як вологість, температура, рН, склад поживних речовин, щільність тощо), середній (контролери для збору та передачі даних) та верхній (аналітичне програмне забезпечення для обробки даних, їх візуалізації та надання рекомендацій).

Основною метою цієї системи є точний моніторинг характеристик ґрунту з метою покращення аграрного планування, раціонального використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарських земель. Завдяки можливості оперативно виявляти зміни в стані ґрунту, фермери можуть своєчасно приймати обґрунтовані рішення щодо поливу, удобрення, сівозміни та інших агротехнічних заходів. В умовах змін клімату та зростаючих вимог до продовольчої безпеки, впровадження таких систем стає критично важливим для сталого розвитку аграрного сектору. Крім цього, в розділі 4 було спроектовано кіберфізичну систему визначення параметрів ґрунту та представлено приклад її роботи.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено автоматизацію процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень визначення параметрів ґрунту. Значення кіберфізичних систем для визначення параметрів ґрунту в Україні зумовлене низкою критичних чинників, серед яких – зростаючий вплив кліматичних змін, втрата родючості ґрунтів та необхідність модернізації агротехнологій задля досягнення сталого розвитку сільського господарства. Зважаючи на те, що аграрний сектор є основною складовою української економіки, впровадження точного моніторингу ґрунтового стану має важливе значення для підвищення продуктивності, раціонального використання земельних і водних ресурсів, а також для скорочення витрат на хімічні засоби. Кіберфізичні системи здатні оперативно збирати дані про такі ключові показники, як вологість, температура та рівень рН, що дозволяє аграріям вчасно реагувати на зміни умов довкілля. Завдяки цьому зменшується ризик надмірного поливу, покращується розподіл води, що набуває особливої актуальності в умовах дедалі частіших посух, спричинених глобальним потеплінням.

Такі системи також відкривають можливості для більш точного прогнозування врожайності та стану ґрунтів, а також формування індивідуалізованих рекомендацій щодо агротехнічних заходів для кожної конкретної ділянки. Ураховуючи різноманіття кліматичних зон та типів ґрунтів на території України, кіберфізичні рішення здатні адаптуватися до специфічних потреб господарств, що сприяє розвитку точного землеробства. Запровадження подібних технологій сприяє не лише охороні природних ресурсів, але й

підвищенню рентабельності агровиробництва. Саме тому створення та застосування кіберфізичних систем для оцінки стану ґрунтів є надзвичайно актуальним завданням, реалізація якого лежить в основі нашого дослідження, спрямованого на розробку методу й відповідної системи для визначення ґрунтових параметрів.

У другому розділі кваліфікаційної роботи здійснено обґрунтований вибір компонентів для побудови нижнього, середнього та комунікаційного рівнів кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Зокрема, для вимірювання вологості, температури та електропровідності обрано багатофункціональний датчик Decagon 5TE. Незважаючи на вищу вартість порівняно з однопараметровими аналогами, він забезпечує одночасне зчитування трьох основних показників, що значно підвищує ефективність збору даних. Для вимірювання кислотності ґрунту було відібрано портативний прилад Bluelab Soil pH Pen, що показав найкраще співвідношення точності та зручності використання. Аналіз варіантів для моніторингу поживних речовин у ґрунті засвідчив доцільність застосування сенсора ECOFUEL Soil Nutrient Sensor, який забезпечує високоточне визначення як органічних, так і мінеральних сполук за прийнятною ціною. Крім того, до системи включено датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor, здатний вимірювати не лише вологість, а й щільність ґрунту, що дозволяє отримати додаткові дані для оцінки його структури.

На середньому рівні системи, що відповідає за обробку та передачу даних, після проведення порівняльного аналізу обрано контролер ESP32. Цей пристрій відзначається високою обчислювальною потужністю, енергоефективністю та підтримкою різноманітних інтерфейсів зв'язку, що робить його оптимальним рішенням для автономних бездротових систем, де важлива економія енергії та стабільність з'єднання при відносно невеликій вартості.

Щодо забезпечення зв'язку між усіма рівнями кіберфізичної системи, було вирішено використовувати стандарт Wi-Fi. Він забезпечує високу швидкість обміну даними, не потребує фізичних з'єднань, сумісний із широким спектром сучасних пристроїв, має відносно низькі витрати на інфраструктуру, добре

масштабується та підтримує сучасні засоби шифрування й захисту інформації. Завдяки низькій затримці та можливості обслуговування великої кількості пристроїв одночасно, цей стандарт ідеально підходить для потреб проєктованої системи.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи розроблено метод збору, моніторингу та керування даними, призначений для функціонування верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Запропонований підхід забезпечує повний, точний та оперативний збір інформації про стан ґрунту в режимі реального часу, що суттєво підвищує ефективність аграрних процесів. Метод базується на інтеграції даних з різноманітних сенсорів, які фіксують такі критичні параметри, як вологість, температура, кислотність, вміст поживних речовин і структура ґрунту. Завдяки цьому аграрії можуть швидко реагувати на зміни в умовах ґрунтового середовища, що дозволяє раціональніше використовувати природні та технічні ресурси – воду, добрива, засоби захисту рослин – та знижувати негативний вплив на довкілля.

Також у цьому розділі було розроблено алгоритм збору, моніторингу та керування даними, що значно підвищує точність аграрних рішень. Автоматизований збір і аналіз даних про основні фізико-хімічні характеристики ґрунту дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо сівоzmіни, поливу, удобрення та інших агротехнічних заходів. Система забезпечує безперервний моніторинг стану ґрунту в режимі реального часу, дозволяючи вчасно реагувати на потенційні загрози, як-от нестача вологи або ознаки ерозії. Окрім цього, управління на основі зібраної інформації сприяє ефективній оптимізації ресурсів, зменшенню витрат і екологічного навантаження. Накопичення та аналіз історичних даних також створюють підґрунтя для стратегічного планування землекористування, виявлення зон деградації ґрунтів і розробки заходів з їх відновлення, що є важливою передумовою сталого розвитку аграрного сектору.

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи розроблено архітектуру кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту, 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, рН, 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.

Додатково, у четвертому розділі спроектовано кіберфізичну систему для визначення параметрів ґрунту, а також представлено приклад її функціонування.

Наукова новизна отриманих результатів: вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, що відрізняється від існуючих аналогів зниженими витратами на впровадження, спрощеним процесом експлуатації та забезпечує високоефективний збір, моніторинг і керування даними різних параметрів із їх збереженням у режимі реального часу.

Практична значущість отриманих результатів полягає у реалізації кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, яка забезпечує ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

За темою кваліфікаційної роботи прийнята до публікації одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

1) Yu. Voichur, I. Payonk. Cyber-physical system for determining soil parameters. Computer systems and information technologies. 2025. №2.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

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. A novel web based application for storing, managing and sharing geotechnical data, illustrated using the national soft soil field testing facility in Ballina, Australia / J. P. Doherty et al. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 93. P. 3–8.
3. Determination of fine-grained soil parameters using an automated system / I. Marzouk et al. *Cone Penetration Testing 2022*. London, 2022. P. 540–545.
4. Mayne P. W. Stress History of Soils from Cone Penetration Tests. *Soils and Rocks*. 2017. Vol. 40, no. 3. P. 203–216.
5. Robertson P. K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. *Canadian Geotechnical Journal*. 2016. Vol. 53, no. 12. P. 1910–1927.
6. Palágyi Š., Štamberg K., Vopálka D. A simplified approach to evaluation of column experiments as a tool for determination of radionuclide transport parameters in rock-groundwater or soil-groundwater systems. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2015. Vol. 304, no. 2. P. 945–954.
7. Determination of SAR System Parameters Constraints from a Soil Moisture Retrieval Scheme / F. Grings et al. *2016 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*, Denver, CO, USA, 31 July – 4 August 2016. 2016.
8. Uncertainty's Effects Assessment and the Relevant Parameters on Soil-Pipe Interaction (SPI) System Responses Using Sobol Sensitivity Analysis / C. Bacha et al. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2024.
9. Binh N. V., Duc T. T., Hoa H. T. T. Assessment of Soil Quality Parameters under Rice and Maize Cropping Systems in Hilly Region of Central Vietnam. *Indian Journal Of Agricultural Research*. 2024.
10. Valentina-Daniela B., Simona-Elena I., Ancuța P.-N. Advanced Autonomous System for Monitoring Soil Parameters. *Technologies*. 2025. Vol. 13, no. 1. P. 38.

11. Blessing S., Giering R., van der Tol C. OptiSAIL: a system for the simultaneous retrieval of soil, leaf, and canopy parameters and its application to Sentinel-3 Synergy (OLCI+SLSTR) top-of-canopy reflectances. *Science of Remote Sensing*. 2024. P. 100148.
12. Data set on soil physicochemical parameters, biomass accumulation and carbon credit generation in different management systems in Rio Verde, GO, Brazil / A. Thomazini et al. *Data in Brief*. 2024. P. 110682.
13. Sengar K. P., Chandrasekaran K. Grounding Systems Transient with Frequency Dependent Soil Parameters: A Time Domain Approach. 2024 *IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES)*, Bhopal, India, 21–22 June 2024. 2024. P. 1–6.
14. 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.
15. Perfection of an Energy-Economic and Environmental Parameters of the Ground Source Heat Pump Systems with Preventing Freezing of the Soil around Ground Pipes / A. Denysova et al. *Problems of the Regional Energetics*. 2024. No. 2(62). P. 107–120.
16. Moradi M. Comparison of Different Approaches for Incorporating Frequency Dependence of Soil Parameters in Time Domain Simulation of Grounding System. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2024. P. 1–13.
17. Temperature and Soil Parameter Monitoring System / P. U. Sharma et al. *Recent Advances in Civil Engineering for Sustainable Communities*. Singapore, 2024. P. 385–393.
18. Doan M.-T., Chen S.-S., Shi J.-Y. A Lumped-Parameter Model for Soil-Pile-Foundation Systems Undergoing Horizontal-Rotational Motions Based on Multiobjective Optimization. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Singapore, 2023. P. 981–989.
19. Environmental and Soil Parameters for Germination of Leaf Spot Disease in the Groundnut Plant using IoT Enabled Sensor System / P. Garg et al. *IEEE Sensors Letters*. 2023. P. 1–4.

20. The effectiveness of the multi-soil-layering system in reducing pollutant parameters of crumb rubber industrial wastewater / S. R. P. Primandari et al. *Teknomekanik*. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 122–135.

21. Soetedjo A., Hendriarianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 20. P. 11294.

22. The Effect of Reduced and Conventional Tillage Systems on Soil Aggregates and Organic Carbon Parameters of Different Soil Types / E. Tobiašová et al. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 818.

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

24. Make the smartest irrigation decisions with SoilSense. URL: <https://soilsense.io/>.

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

26. SmartField Technologies. URL: <https://smartfield.tech/>.

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

28. iSyst (Smart Soil Monitoring System). URL: <https://isyst.de/en/>.

29. Hayashi H., Yamazoe N. A practical procedure for determining soil parameters of peat for finite element analysis using the cam clay model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 2023. P. 1–41.

30. Düllmann J., Alber M., Plinninger R. J. Determining soil abrasiveness by use of index tests versus using intrinsic soil parameters / Bewertung der Abrasivität von Lockergesteinen mit Indexverfahren und herkömmlichen Bodenkennwerten. *Geomechanics and Tunnelling*. 2014. Vol. 7, no. 1. P. 87–97.

31. An efficient method for determining DEM parameters of a loose cohesive soil modelled using hysteretic spring and linear cohesion contact models / X. Wang et al. *Biosystems Engineering*. 2022. Vol. 215. P. 283–294.

32. Verification of soil parameters of hardening soil model with small-strain stiffness for deep excavations in medium dense sand in Ho Chi Minh City, Vietnam / Q. T. Huynh et al. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2021. Vol. 7, no. 1.
33. Brinkgreve R., Zekri A., Laera A. Towards An Integrated And Automated Digital Workflow In Geotechnical Engineering. *7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. 2024.
34. Data-driven site characterization - Focus on small-strain stiffness / H. Felić et al. *7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization*. 2024.
35. APD: An automated parameter determination system based on in-situ tests / I. Marzouk et al. *Computers and Geotechnics*. 2024. Vol. 176. P. 106799.
36. CPTU Interpretation for Silty Sand in Binh Dai Offshore Wind Farm / K. Wang et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2185, no. 1. P. 012073.
37. Karray M., Hussien M. N. Why is there a discrepancy in shear wave velocity – cone tip resistance (V_s – q_c) correlations' trends with respect to grain size?. *Canadian Geotechnical Journal*. 2018. Vol. 55, no. 7. P. 1041–1047.
38. Hauser L., Schweiger H. F. Numerical simulation of cone penetration testing using the Particle Finite Element Method. *Bautechnik*. 2023.
39. Rauter S., Tschuchnigg F. CPT Data Interpretation Employing Different Machine Learning Techniques. *Geosciences*. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 265.
40. Munsterman D. K., Deckers J. Cross-border correlations showing diachronous lithostratigraphic units in the southeastern North Sea Basin during the Early Oligocene (middle-late Rupelian). *Netherlands Journal of Geosciences*. 2024. Vol. 103.
41. Application of Cone Penetration Test Technology in Whole Process Inspection of Reinforcing Hydraulic Fill Sand Foundation / D.-y. Wang et al. *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Ground Improvement and Geosynthetics*. Singapore, 2018. P. 145–156.
42. A new approach to constructing SPT-CPT correlation for sandy soils / Y.-C. Lu et al. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2022. P. 1–17.

43. Chala A., Ray R. Impact of Randomized Soil Properties and Rock Motion Intensities on Ground Motion. *Advances in Civil Engineering*. 2024. Vol. 2024. P. 1–12.
44. A Multidisciplinary Tool for the Development of a Regional-scale Geotechnical Model: A Case Study in the North-Western Adriatic Coastal Area / L. Tonni et al. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 158. P. 546–551.
45. Bilgin Ö., Arens K., Dettloff A. Assessment of variability in soil properties from various field and laboratory tests. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 2019. Vol. 13, no. 4. P. 247–254.
46. Study of mining tailings geotechnical parameters obtained from SCPTu tests carried on dry and saturated layers / H. P. Nierwinski et al. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Vol. 337. P. 04010.
47. Long-Term Slope Stability of Abandoned Mine Lake–Numerical Modelling and Risk Assessment / V. Renaud et al. *RawMat 2021*. Basel Switzerland, 2021.
48. Causes of failure of a four-storey building and the reconstruction concept / J. Rzeźniczak et al. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 284. P. 03008.
49. Karray M., Hussien M. N. Shear wave velocity as function of cone penetration resistance and grain size for Holocene-age uncemented soils: a new perspective. *Acta Geotechnica*. 2017. Vol. 12, no. 5. P. 1129–1158.
50. Abbaszadeh Shahri A., Naderi S. Modified correlations to predict the shear wave velocity using piezocone penetration test data and geotechnical parameters: a case study in the southwest of Sweden. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2016. Vol. 1, no. 1.
51. Mikrostruktur des Salzburger Seetons – Charakterisierung basierend auf Drucksondierungen / S. Oberhollenzer et al. *Geomechanics and Tunnelling*. 2019. Vol. 12, no. 4. P. 340–351.
52. Analysis of long-term settlement of road embankment on peat ground during its service period / N. Yamazoe et al. *Soils and Foundations*. 2023. Vol. 63, no. 5. P. 101362.
53. Nguyen B. T., Ishikawa T., Murakami T. Numerical analysis of in-situ water content and temperature variations due to effects of grass. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 660–668.

54. Verification of topography and soil condition of slope where disaster occurred during snowmelt season in railway / T. Takayanagi et al. *Japanese Geotechnical Journal*. 2019. Vol. 14, no. 2. P. 123–139.
55. A rational design approach to peat ground improvement by vertical drains / N. Yamazoe et al. *Soils and Foundations*. 2020. Vol. 60, no. 6. P. 1387–1404.
56. Hayashi H., Nishimoto S., Yamanashi T. Determination method of input parameters for elasto-plastic FE analysis of peat ground. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. 2014. P. 163–168.
57. Bagheri M., Rezania M., Nezhad M. M. An Experimental study of the initial volumetric strain rate effect on the creep behaviour of reconstituted clays. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2015. Vol. 26. P. 012034.
58. Numerical analysis of hydro-thermal behaviour of Rouen embankment under climate effect / N. An et al. *Computers and Geotechnics*. 2018. Vol. 99. P. 137–148.
59. Malaya C., Sreedeeep S. Suction–Water Content Relationship for Hill Soil of North-East India. *Urban Hydrology, Watershed Management and Socio-Economic Aspects*. Cham, 2016. P. 127–134.
60. Coefficient of secondary consolidation of peatsand its application to ground improved by plastic-board drain method / N. Yamazoe et al. *Japanese Geotechnical Journal*. 2017. Vol. 12, no. 4. P. 409–424.
61. Hayashi H., Nishimoto S. Effect on Reduction in Secondary Consolidation of Vacuum Preloading Method for Peat Deposit and Its Estimation. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*. 2014. Vol. 63, no. 1. P. 32–37.
62. Numerical study on the effects of groundwater table oscillation beneath the “Palazzaccio” courthouse in Rome / G. D’ Alessio et al. *E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 382. P. 17006.
63. Modified Hyperbolic Model for Dynamic Properties of Peaty Organic Soils / P. Wang et al. *Geo-Congress 2023, Los Angeles, California*. Reston, VA, 2023.
64. Tanaka H., Hayashi H. Applicability of Isotache model to peaty ground. *Japanese Geotechnical Journal*. 2014. Vol. 9, no. 2. P. 275–286.

65. Long M., Grimstad G., Trafford A. Prediction of embankment settlement on Swedish peat using the Soft Soil Creep model. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*. 2020. P. 1–43.

66. Kang H., Ahn K. Effect of Electro-Osmosis Method on Marine Clay with Preloading. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*. 2015. Vol. 16, no. 2. P. 53–58.

67. An Efficient Calibration Technique for Heat Dissipation Matric Water Potential Sensors / X. Pan et al. *Soil Science Society of America Journal*. 2015. Vol. 79, no. 4. P. 1115–1122.

68. Agarwal P., Sharma P. K. Analyzing the Effects of Irrigation on the Sensitivity and Estimability of Soil Hydraulic Parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2022. Vol. 148, no. 7.

69. Shirgure P., Rajput G. Evaporation Estimations with Neural Networks. *Evapotranspiration*. 2013. P. 109–130.

70. Dixon K. L. Method development for determining the hydraulic conductivity of fractured porous media. *Office of Scientific and Technical Information (OSTI)*, 2013.

71. Maggi S. Estimating water retention characteristic parameters using differential evolution. *Computers and Geotechnics*. 2017. Vol. 86. P. 163–172.

72. Effect of biogas waste applications on soil moisture characteristic curve and assessment of the predictive accuracy of the Van Genuchten model / P. Alaboz et al. *Eurasian Journal of Soil Science (EJSS)*. 2021. Vol. 10, no. 2. P. 142–149.

73. Inverse Modeling of Soil Hydraulic Parameters Based on a Hybrid of Vector-Evaluated Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization / Y.-B. Li et al. *Water*. 2018. Vol. 10, no. 1. P. 84.

74. Albu A., Gorchakov A., Zubov V. On the Effectiveness of the Fast Automatic Differentiation Methodology. *Communications in Computer and Information Science*. Cham, 2019. P. 264–276.

75. Use of Global Sensitivity Analysis to Help Assess Unsaturated Soil Hydraulic Parameters / A. Younes et al. *Vadose Zone Journal*. 2013. Vol. 12, no. 1. P. vzj2011.0150.

76. Hamzaban M.-T., Mohammadi N. R. S., Jakobsen P. D. The effect of the particle size distribution curve on the abrasivity of non-cohesive soils in LCPC test. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2020. Vol. 105. P. 103573.
77. Abu Bakar M. Z., Majeed Y., Rashid M. A. Influence of propeller material hardness, testing time, rock properties, and conditioning on LCPC rock abrasiveness test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2020.
78. Water content, effective stress, and rotation speed impact on the abrasivity of granular soils in LCPC test results / M. T. Hamzaban et al. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 87. P. 41–55.
79. The effect of the plastic behavior of clay particles on LCPC abrasive coefficient / M.-T. Hamzaban et al. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2019. Vol. 92. P. 103054.
80. Majeed Y., Abu Bakar M. Z. Effects of variation in the particle size of the rock abrasion powder and standard rotational speed on the NTNU/SINTEF abrasion value test. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017. Vol. 78, no. 3. P. 1537–1554.
81. Barzegari G., Uromeihy A., Zhao J. A newly developed soil abrasion testing method for tunnelling using shield machines. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 2013. Vol. 46, no. 1. P. 63–74.
82. Jakobsen P. D., Bruland A., Dahl F. Review and assessment of the NTNU/SINTEF Soil Abrasion Test (SAT™) for determination of abrasiveness of soil and soft ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013. Vol. 37. P. 107–114.
83. Barzegari G., Uromeihy A., Zhao J. Parametric study of soil abrasivity for predicting wear issue in TBM tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2015. Vol. 48. P. 43–57.
84. Mirmehrabi H., Ghafoori M., Lashkaripour G. Impact of some geological parameters on soil abrasiveness. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2015. Vol. 75, no. 4. P. 1717–1725.
85. Gharahbagh E. A., Qiu T., Rostami J. Evaluation of Granular Soil Abrasivity for Wear on Cutting Tools in Excavation and Tunneling Equipment. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2013. Vol. 139, no. 10. P. 1718–1726.

ДОДАТОК А (обов'язковий)

КОПІЇ СТАТТІ У ФАХОВОМУ НАУКОВОМУ ВИДАННІ

1) Yu. Voichur, I. Payonk. Cyber-physical system for determining soil parameters. Computer systems and information technologies. 2025. №2.

UDC 004.9

Yu. O. VOICHUR, I. S. PAYONK

Khmelnitskyi National University

CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR DETERMINING SOIL PARAMETERS

The relevance of a cyber-physical system for determining soil parameters in Ukraine is determined by several important factors, including climate change, declining soil fertility, and the need to implement efficient technologies to ensure sustainable agriculture. In Ukraine, where a large part of the economy depends on the agricultural sector, accurate soil monitoring is a key aspect to increase the efficiency of agricultural production, optimize the use of water and land resources, and reduce the cost of fertilizers and pesticides.

Cyber-physical systems can provide timely data collection on soil moisture, temperature, pH, and other critical soil parameters, allowing farmers to respond quickly to changes in environmental conditions. Such systems can reduce the negative impact of excessive irrigation and optimize the use of water resources, which is especially important in the face of drought, which is increasingly common in Ukraine due to climate change.

These systems also allow for accurate forecasts of yields and soil conditions, as well as the development of individualized recommendations for each field or plot. Since Ukraine has a wide variety of climatic conditions and soil types, cyber-physical systems are able to adapt to different agricultural needs, making them extremely useful for the development of precision agriculture.

The introduction of such technologies helps not only to preserve natural resources but also to improve the economic efficiency of agriculture. Therefore, the development and implementation of cyber-physical systems for soil monitoring is an extremely important step for the sustainable development of Ukraine's agricultural sector. Therefore, our research is devoted to the development of a method and a cyber-physical system for determining soil parameters.

The cyber-physical system for determining soil parameters consists of three levels: the level of sensors, the level of the controller to which the sensors are connected, and the system for collecting, monitoring, and managing data in real time. To build a cyber-physical system for determining soil parameters, we selected sensors, selected a controller, selected a data transmission standard, and developed a method for collecting, monitoring, and controlling data. The proposed method of data acquisition, monitoring and control for the upper level of the cyber-physical soil parameterization system allows for efficient data acquisition, monitoring and control in a cyber-physical system with various parameters stored in real time.

Keywords: cyber-physical system, soil parameters, sensors of soil moisture, soil temperature, soil electrical conductivity, soil acidity (pH), nutrient content (nitrogen, phosphorus, potassium) and organic matter and minerals in the soil, soil texture (density), controllers, data transmission standards.

Ю. О. ВОЙЧУР, І. С. ПАЙОНК

Хмельницький національний університет

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ҐРУНТУ

Анотація – Актуальність кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту в Україні визначається кількома важливими факторами, зокрема змінами клімату, зменшенням родючості ґрунтів та необхідністю впровадження ефективних технологій для забезпечення сталого сільського господарства. В Україні, де значна частина економіки залежить від аграрного сектора, точний моніторинг стану ґрунту є ключовим аспектом для підвищення ефективності сільського виробництва, оптимізації використання водних та земельних ресурсів і зменшення витрат на добрива та пестициди.

Кіберфізичні системи можуть забезпечити своєчасний збір даних про вологість, температуру, рівень pH та інші критичні параметри ґрунту, що дозволить фермерам оперативно реагувати на зміни в умовах навколишнього середовища. Завдяки таким системам можна зменшити негативний вплив надмірного поливу, оптимізувати використання водних ресурсів, що є особливо важливим в умовах посухи, що все частіше виникає в Україні через зміни клімату.

Ці системи також дозволяють отримувати точні прогнози щодо врожайності та стану ґрунту, а також розробляти індивідуальні рекомендації для кожного поля чи ділянки. Оскільки в Україні існує велика різноманітність кліматичних умов та типів ґрунтів, кіберфізичні системи здатні адаптуватися до різних аграрних потреб, що робить їх надзвичайно корисними для розвитку точного землеробства.

Впровадження таких технологій допомагає не тільки зберігати природні ресурси, але й покращити економічну ефективність сільського господарства. Тому розробка та впровадження кіберфізичних систем для моніторингу ґрунтів є надзвичайно важливим кроком для сталого розвитку аграрного сектора України. Відтак наше дослідження присвячене розробленню методу та кіберфізичної системи для визначення параметрів ґрунту.

Кіберфізична система визначення параметрів ґрунту складається з трьох рівнів – рівня датчиків, рівня контролера, до якого приєднуються датчики, а також з системи збору, моніторингу та керування даними в реальному часі. Для побудови кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту було виконано вибір датчиків, вибір контролера, вибір стандарту передачі даних та розроблено метод збору, моніторингу та керування даними. Пропонований метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту дозволяє забезпечити ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

Ключові слова: кіберфізична система, параметри ґрунту, датчики вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (pH) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту, контролери, стандарти передачі даних.

Introduction

The relevance of determining soil parameters is of great importance in a number of scientific and practical fields, as soils are the basis for agriculture, ecology, and construction.

To grow plants optimally, it is necessary to know parameters such as soil structure, acidity (pH), moisture, nutrient content (nitrogen, phosphorus, potassium), and organic matter. Determining these parameters allows us to develop precise recommendations for fertilization, watering, and selecting the most suitable crops for specific conditions [1].

Analysis of soil parameters is an important part of monitoring the environmental condition of territories. Changes in soil composition can signal pollution, erosion, or other negative processes. Soil surveys help determine the impact of anthropogenic factors on ecosystems and take measures to preserve biodiversity.

Soil parameters, such as bearing capacity, density, water permeability, and moisture capacity, are critical for the design and construction of various facilities, from residential buildings to large infrastructure projects. Knowing these characteristics helps to avoid problems with foundations, soil subsidence, or flooding in the future [2].

Soils interact with the atmosphere and regulate the carbon cycle, so their analysis is important for climate change research. Determination of soil parameters helps to assess the ability of soils to absorb carbon, which is important for understanding climate change and planning mitigation measures.

Soil contamination with heavy metals, pesticides, or other toxic substances requires rapid determination of parameters to take cleanup measures. Sustainable development technologies involve monitoring and improving soil quality, which directly affects agricultural productivity and the environment [3].

Determination of soil parameters is the basis for proper management of natural resources and sustainable development. The importance of this process is growing in light of current challenges, such as climate change, environmental pollution, and declining soil fertility. Since soil is not only a medium for growing plants but also an integral part of the ecosystem, its condition directly affects the health of people, animals and plants. Correct determination of the physical, chemical and biological properties of soil allows us to respond to environmental changes in a timely manner and develop effective strategies for the conservation and restoration of natural resources.

In addition, soil research is essential for the development of new technologies in agriculture. For example, determining the level of moisture in the soil allows for the creation of irrigation systems that use water as efficiently as possible, and helps to develop methods to combat droughts or other climatic phenomena. At the same time, analyzing the chemical composition of the soil allows for more accurate fertilizer dosing, which helps to increase yields without harming the environment [4].

In the context of construction, knowledge of soil parameters helps to avoid serious technical problems. For example, an incorrect determination of soil density can lead to building settling, which poses a risk to their stability. Convincing research and accurate data also help to reduce the cost of building materials, increasing the reliability of structures.

All of this confirms that the correct determination of soil parameters is a key element in maintaining a stable and healthy environment for both people and nature in general. Thus, this process is not only important, but also extremely relevant for the development of society, especially in the context of modern environmental and technological challenges [5].

So, determining soil parameters is essential for sustainable development, optimization of agricultural activities, as well as for environmental safety and conservation of natural resources.

A cyber-physical system (CPS) for determining soil parameters is an innovative solution that combines physical sensors, computer algorithms, and network technologies to monitor and analyze soil conditions in real time. Such systems allow automating the process of collecting data on soil parameters, which is extremely important for agriculture, ecology, and construction [6, 7].

The main components of a cyber-physical system [8-10]:

- Sensors - specialized sensors that measure various soil parameters, such as humidity, temperature, pH, electrical conductivity, organic matter and mineral content. The sensors can be embedded in the soil or installed on its surface, and can be integrated into automated systems for data collection.
- Data processing - the collected data is transferred to a central computing platform where it is processed using machine learning algorithms or analytical models. This allows us to identify correlations between different soil parameters and make accurate predictions about its condition.
- Data networks - wireless or wired networks are used to transmit information from sensors to processing systems. This allows for real-time monitoring and remote access to data from anywhere in the world.
- User interface - usually the system provides an interface for users (agronomists, engineers, environmentalists) through which you can get monitoring results, view statistics, configure sensor parameters, or receive warnings about changes in soil parameters.

Advantages of cyber-physical systems for determining soil parameters [11-13]:

- Accuracy and efficiency - CPS allows for accurate measurements of soil parameters in real time, which is especially important for agribusiness, where changes in soil moisture or acidity can directly affect the yield.

- Automation of the process - by automating data collection and processing, CFS minimizes the human factor and reduces the cost of manual measurements, which saves time and resources.
- Prediction and adaptation - based on the analysis of the data, the system can make predictions about changes in soil conditions, such as the risk of drought, erosion or changes in acidity, and offer optimal solutions for adaptation.
- Improving agricultural technologies - thanks to accurate data, farmers can develop individualized strategies for watering, fertilizing, and tillage, which helps to increase the efficiency of crop production and conserve natural resources.
- Environmental friendliness - determining precise soil parameters reduces the use of chemical fertilizers and water, which has a positive impact on the environment, contributing to sustainable agricultural development and ecosystem protection.

Cyber-physical systems for soil monitoring are actively used in agriculture to accurately control soil moisture and pH levels, as well as to monitor soil erosion or wear and tear. This allows not only to improve yields but also to reduce the cost of watering and fertilizing. In construction, such a system is used to determine soil characteristics, which helps to maintain the stability of construction projects and prevent undesirable consequences due to improper construction work [14, 15].

A cyber-physical system for determining soil parameters is a powerful tool that helps not only to optimize agronomy and construction processes, but also to conserve natural resources and ensure environmental sustainability. The introduction of such technologies significantly increases the efficiency of soil resource management, which is an important step towards sustainable development and environmental protection [16-18].

There are several well-known cyber-physical soil monitoring systems that are used to analyze various soil parameters such as moisture, temperature, pH, organic content, and other factors that affect agriculture and the environment [19-22].

There are some examples of such systems:

1. Agrilink (Soil monitoring system for agriculture) [23]

Main functions:

- Measurement of soil moisture, temperature and pH levels.
- Data collection and analysis using wireless sensors.
- Prediction and optimization of irrigation based on the analysis of soil parameters.
- Adaptation to different crops.

Advantages:

- Reduced water and fertilizer costs.
- Increased efficiency of agricultural production.
- Interface for farmers to analyze and configure monitoring parameters.

2. SoilSens (Soil Sensors for Agriculture) [24]

Main functions:

- Uses sensors to measure soil moisture, pH, temperature, and electrical conductivity.
- The platform allows receiving real-time data through a mobile application or web interface.
- Can integrate with other agronomic systems to improve irrigation efficiency.

Advantages:

- Easy to install and configure the system.
- Increased yields through precise resource management.
- Support for sustainable agricultural development.

3. Sentek (Soil Moisture Monitoring Systems) [25]

Main functions:

- Specializes in monitoring soil moisture and hydrological characteristics.
- Measures the level of moisture at different soil depths, which allows the farmer to more accurately control irrigation.

- Uses a combination of sensors and a network to transmit data in real time.

Advantages:

- Improves irrigation efficiency.
- Allows to reduce water consumption, which is important for water-saving agricultural technologies.
- Helps to preserve soil resources and reduce erosion.

4. Smartfield (Soil conditions monitoring system) [26]

Main functions:

- Designed to measure soil parameters such as moisture, temperature and pH.
- It provides data for agronomists and farmers to fine-tune the conditions for crop growth.
- It has the ability to set up automatic watering and monitor irrigation.

Advantages:

- Easy integration with other agronomic systems.
- Automation of soil condition monitoring.

- Optimization of water and land resources use.

5. Field Climate (Platform for weather and soil monitoring) [27]

Main functions:

- Specializes in monitoring various parameters of weather conditions and soil conditions.
- It uses sensors to determine soil moisture, temperature, and other factors affecting plant health.
- It can provide accurate forecasts and recommendations based on the data collected.

Advantages:

- High level of monitoring automation.
- Integration with mobile applications for real-time data access.
- Possibility to reduce the use of water and chemical fertilizers.

6. iSyst (Smart Soil Monitoring System) [28]

Main functions:

- Uses high-precision sensors to monitor the amount of water in the soil, pH, electrical conductivity, and temperature.

- Data is transmitted via wireless channels to a central system for analysis and display on a user interface.

Advantages:

- High measurement accuracy and the ability to customize system parameters.
- Helps in managing water resources and increasing agricultural productivity.

Cyber-physical systems for soil monitoring are actively used to accurately collect data on soil conditions and manage natural resources. They allow farmers and environmentalists to monitor soil quality more accurately and efficiently, which is important for maintaining soil fertility, increasing yields, and sustainable agricultural development. The systems also help reduce environmental impact by optimizing the use of water and fertilizers.

Thus, the task of creating a cyber-physical system for determining soil parameters is *relevant*. Therefore, our *research focuses* on the design of a cyber-physical system for determining soil parameters.

Cyber-physical system for determining soil parameters

Cyber-physical system for determining soil parameters is an integrated technology platform that combines physical sensors, computing resources, and software for automated monitoring, analysis, and management of soil conditions in real time. Such a system is an important component of modern smart agriculture, environmental monitoring, and sustainable use of natural resources.

In general, a cyber-physical system consists of three levels: lower, middle, and upper [29]. The lower level is the level of sensors. The middle level is the level of the controller to which the sensors are connected. The upper level is a system for collecting, monitoring, and controlling the data of a cyber-physical system in real time. So, to build a cyber-physical system, you should select sensors to form the lower layer, select a controller to form the middle layer, and develop scenarios and an algorithm for collecting, monitoring, and controlling data to form the upper layer. In addition, the method and standard of data transmission should be chosen to establish communication between the components of all three layers.

The main parameters to be determined by the cyber-physical system under development will be: soil moisture, soil temperature, soil electrical conductivity, soil acidity (pH), nutrient content (nitrogen, phosphorus, potassium) and organic matter and minerals in the soil, and soil texture (density).

The following sensors are used to measure soil moisture:

1) capacitive soil moisture sensors, which measure changes in the dielectric constant of the soil - the more moisture, the higher the capacitance; their advantages are accuracy and stability, insensitivity to salts, durability; popular models are DFROBOT Capacitive Sensor, SEN0193;

2) resistive soil moisture sensors, which are based on a change in electrical resistance between two electrodes that depends on humidity; their advantages are low cost and ease of use, while their disadvantages are lower accuracy and faster wear due to corrosion; a popular model is YL-69;

3) tensiometers, which measure the pressure that plants have to apply to absorb water from the soil; their advantages are accuracy (even in high humidity) and suitability for agricultural purposes; disadvantages are lower efficiency in dry soil and the need for maintenance;

4) gravimetric sensors (gravimetric method), which determine moisture content by weighing samples before and after drying; the most accurate, but unsuitable for automatic monitoring, used only in laboratories;

5) sensors using Time Domain Reflectometry (TDR), which measure the time of electromagnetic wave transmission through the soil; their advantages are high accuracy and operation in a wide range of soil types; the disadvantage is high cost; popular models are Decagon 5TE, Campbell Scientific CS616.

A comparative analysis of popular soil moisture sensors is presented in Table 1.

Table 1 – Comparative analysis of popular soil moisture sensors

Model	Type	Accuracy	Power supply	Interface	Durability	Cost, USD	Purpose
YL-69	Resistive	Low ($\pm 10\text{--}15\%$)	3.3–5V	Analog + digital	Low (up to 6 months)	1-3	Initial training, amateur projects. Measures humidity only
DFROBOT SEN0193	Capacitive	Medium ($\pm 5\%$)	3.3–5V	Analog	High (1–2 years)	6-10	Household use, DIY projects. Measures humidity only
Decagon 5TE	Capacitive	High ($\pm 1\text{--}2\%$)	3.6–15V	SDI-12 / UART	High (3+ years)	200-250	Professional agricultural monitoring. Measures soil moisture, temperature and electrical conductivity
TDR Campbell CS616	TDR	Very high ($\pm 1\%$)	5–18V	TTL / RS-232	High (5+ years)	300-400	Scientific research, engineering systems. Measures soil moisture and dielectric constant

It is obvious that although the *Decagon 5TE* sensor is more expensive than simple single-parameter sensors, it measures three key parameters for our system simultaneously, so we will use the Decagon 5TE sensor to measure soil moisture, temperature, and electrical conductivity.

A comparative analysis of common sensors for measuring soil acidity (pH) is presented in Table 2.

‡ Table 2 – Comparative analysis of common sensors for measuring soil acidity (pH)

Model	Type	pH range	Accuracy	Interface	Cost, USD	Features
DFRobot Gravity pH Sensor	Galvanic electrode	0 – 14	$\pm 0.1\text{--}0.2$	Analog, BNC	30-50	Calibration required; probe replaceable. Measures soil acidity only
Atlas Scientific pH Sensor	Laboratory electrode	0 – 14	$\pm 0.002\text{--}0.01$	UART / I2C / Analog	70-150	Very accurate; calibration supported. Measures soil acidity only
SEN0161 (DFRobot v1.1)	Analog pH sensor	0 – 14	$\pm 0.1\text{--}0.2$	Analog	20-35	Budget, suitable for Arduino. Measures soil acidity and temperature
Vernier Soil pH Sensor	Professional (trial)	2 – 10	± 0.2	Analog, compatible with LoggerPro	100-150	Stable for long-term monitoring. Measures soil acidity only

Hanna HI99121	Portable meter	0 – 14	±0.02	Handheld, digital display	300-500	Field pH meter with built-in probe. Measures soil acidity and temperature
Bluelab Soil pH Pen	Portable	3 – 9	±0.1	Handheld	100-120	Easy to use, with display. Measures soil acidity, temperature

Given the comparative analysis, to implement our cyber-physical system we will use the portable *Bluelab Soil pH Pen* sensor to measure soil acidity.

A comparative analysis of different sensors for measuring the content of nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium), organic matter and minerals in the soil is presented in Table 3.

Table 3 – Comparative analysis of different sensors for measuring the content of nutrients (nitrogen, phosphorus, potassium), organic matter and minerals in the soil

Model	Measurement parameters	Measurement range	Type of measured substances	Cost, USD	Features
ECOFUEL Soil Nutrient Sensor	Nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), organic matter, minerals	Nitrogen: 0–150 ppm, Phosphorus: 0–50 ppm, Potassium: 0–250 ppm	Nutrients, organic matter	500-700	Interface: Bluetooth, used for agronomy, horticulture
METER Group HydroSense	Nitrogen, phosphorus, potassium, moisture, soil temperature	Varies depending on specific sensors	Nutrients, soil moisture	600-900	Interactive system for monitoring water balance
LusterLeaf 1601 (Soil Test Kit)	Nitrogen, phosphorus, potassium	Varies depending on the test (different ranges)	Nitrogen, phosphorus, potassium	40-60	Possibility of home use, manual analysis kits
Hanna Instruments HI83200	Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, iron and others	According to tests, from a few ppm to g/l	Nutrients, minerals	300-500	Multimeter, supports various testing methods
SoilOptix	Nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, organic matter	Variable, depending on soil type	Nutrients, organic matter	5000-10000	Uses spectroscopy to analyze soil
Bluelab Soil pH Pen (v2)	Soil pH, soil temperature, moisture (nitrogen, phosphorus, potassium)	pH: 0–14, Temperature: -5 to 60°C	Soil pH, soil temperature	100-150	Portable, fast measurement, ideal for field conditions
Yara N-Tester	Nitrogen (N)	0–250 ppm nitrogen in soil	Nitrogen	200-300	Portable, used for quick nitrogen content check

Given the comparative analysis conducted, to implement our cyber-physical system we will use the *ECOFUEL Soil Nutrient Sensor*, which offers the most accurate measurement of all major nutrients, including organic matter and minerals, and has a relatively low cost.

A comparative analysis of different sensors for measuring soil texture (density) is presented in Table 4.

Table 4 – Comparative analysis of different sensors for measuring soil texture (density)

Model	Measurement parameters	Measurement range	Type of measured substances	Cost, USD	Features
Eijkelkamp Soil Moisture Sensor	Soil moisture, Soil density	Humidity: 0–100%, Soil Density: 1–2 g/cm ³	Soil humidity, density	300-600	Suitable for studies requiring precise measurements
Campbell Scientific CS655	Soil moisture, soil temperature, soil texture	Humidity: 0–100%, Temperature: -40°C to 50°C	Humidity, temperature, texture	500-800	Uses for long-term soil observations
Veris Technologies 3100	Soil moisture, electrical conductivity, soil texture	Humidity: 0–100%, EC: 0–10 dS/m	Humidity, texture, soil EC	5000-10000	Mobile monitoring, uses in field conditions

Taking into account the comparative analysis, to implement our cyber-physical system we will use the *Eijkelkamp Soil Moisture Sensor*, which measures not only soil moisture, but also soil density, which is an important parameter for assessing soil structure, and has a relatively low price.

To form an average level of cyber-physical system for determining soil parameters, a comparative analysis of controllers was conducted, the results of which are presented in Table 5.

Table 5 – Comparative analysis of controllers that can be used for an average level of cyber-physical system for determining soil parameters

Controller	Input ports	Output ports	Communication protocols	Features	Cost, USD
Arduino UNO	14 digital, 6 analog ports	12 digital, 6 analog ports	I2C, SPI, UART	Easy to use, large support community, cheap	20-30
Raspberry Pi 4	40 GPIO pins, support for digital and analog signals	HDMI, USB, GPIO pins, Ethernet	I2C, SPI, UART, Ethernet, Wi-Fi	Powerful, Linux support, large selection of peripherals	35-100
ESP32	34 analog digital ports, 15 digital ports	34 outputs for servos, LEDs, sensors	Wi-Fi, Bluetooth, I2C, SPI, UART	Built-in Wi-Fi and Bluetooth, energy efficient	5-15
BeagleBone Black	69 digital/analog ports	GPIO, UART, SPI, I2C, PWM	Ethernet, UART, SPI, I2C, CAN	Powerful, Linux support, multi-functional	45-60
Intel Edison	20 digital pins, 6 analog ports	20 digital pins, 6 analog outputs	Wi-Fi, Bluetooth, UART, SPI, I2C	Compact, built-in Wi-Fi and Bluetooth, for industrial applications	50-80
Adafruit Feather M0	20 digital pins, 6 analog ports	20 pins for connecting sensors	I2C, SPI, UART	Small size, easy to use, supports various sensors	20-30
NXP i.MX RT1060	144 pins for digital/analog ports	GPIO, SPI, UART, CAN, Ethernet	I2C, SPI, UART, Ethernet	High performance, suitable for complex applications	60-100

Given the comparative analysis, to implement our cyber-physical system, we will use the *ESP32 controller*, which is a powerful device with many connectivity options, is an energy-efficient option, especially for autonomous systems where low power consumption is important, is an excellent option for wireless systems with low power consumption, especially considering its low price.

As a data transmission standard in the designed system, we will choose Wi-Fi, which supports high data transfer rates, allows you to connect to the network without the need for wires, is supported by most modern devices, has a relatively inexpensive infrastructure, is easily scalable, supports modern security protocols, has low data transfer latency, allows you to connect many devices simultaneously without significant losses in speed or connection quality.

The method of data collection, monitoring and management for the upper level of the cyber-physical soil parameter determination system includes several main stages:

- 1) system initialization – configuration loading (reading settings parameters from the database or configuration file: data collection intervals, sensor types, monitoring parameters, alarm thresholds); connecting to mid-level controllers (checking communication with the mid-level (controllers) via Wi-Fi protocol, determining whether all sensors are correctly connected); checking the operability of sensors (initializing all sensors and checking their operability, checking whether the data is read correctly and whether there are no errors);

- 2) collecting data from sensors – sensor polling (the controller regularly polls the sensors at the lower level); data collection (sensors transmit their readings to the mid-level via Wi-Fi protocol); data quality checking (before transmitting data to the upper level, the system checks the correctness of the received values);

- 3) data processing at the mid-level – filtering and processing (the received data can be pre-processed at the mid-level); instant analysis (evaluating collected data to detect anomalies, such as high humidity or abnormal temperatures, and generating alerts for the upper level); transferring results to the upper level (data is transmitted to a central data collection system (upper level) for further processing);

- 4) monitoring and visualization at the upper level - data collection and storage (sensors transmit their readings to a server or central monitoring system; data is stored in a database for further analysis and reporting); visualization (graphs and charts are created on a web interface or mobile application to present data; the ability to view historical data and analyze trends over different periods); real-time monitoring (the upper level system provides real-time data display for users or operators, this can be displayed in the form of interactive panels or automatically updated interfaces);

- 5) analysis and decision-making – anomaly and threshold detection (based on the collected data, the system can apply algorithms to detect anomalies or thresholds, for example, when the soil temperature exceeds a given norm; if the parameters go beyond safe values, the system should send an alarm signal (warning via SMS, email or interface)); control algorithms (when the system detects that the parameters go beyond the norm, it can automatically trigger certain actions); support for decisions based on artificial intelligence (if necessary, the system can use machine learning or artificial intelligence algorithms to predict changes in parameters and recommendations for actions);

- 6) user interface – management (users can manually control the system via a web interface or mobile application, changing settings, thresholds and activating or deactivating certain devices; there may be integration with voice assistants); data analysis (the ability to create reports based on collected data, for example, to derive forecasts or resource planning; access to historical data to view changes and trends over time);

- 7) automated event response – automatic adjustment of parameters (if the system detects negative trends (for example, soil drying out), it can automatically activate the necessary devices (irrigation systems)); sending alerts (the system automatically sends messages (via SMS, email, or other channels) in case of critical events);

- 8) analysis and storage of results – after collecting and monitoring data, statistical and predictive analysis can be performed to improve the system's operation, as well as using historical data to determine the best operating conditions or improve the model.

The proposed method of data collection, monitoring and management for the top level of a cyber-physical system for determining soil parameters allows for effective data collection, monitoring and management in a cyber-physical system with various parameters stored in real time.

Conclusions

The relevance of a cyber-physical system for determining soil parameters in Ukraine is determined by several important factors, including climate change, declining soil fertility, and the need to implement efficient technologies to ensure sustainable agriculture. In Ukraine, where a large part of the economy depends on the agricultural sector, accurate soil monitoring is a key aspect to increase the efficiency of agricultural production, optimize the use of water and land resources, and reduce the cost of fertilizers and pesticides.

Cyber-physical systems can provide timely data collection on soil moisture, temperature, pH, and other critical soil parameters, allowing farmers to respond quickly to changes in environmental conditions. Such systems can reduce the negative impact of excessive irrigation and optimize the use of water resources, which is especially important in the face of drought, which is increasingly common in Ukraine due to climate change.

These systems also allow for accurate forecasts of yields and soil conditions, as well as the development of individualized recommendations for each field or plot. Since Ukraine has a wide variety of climatic conditions and soil

types, cyber-physical systems are able to adapt to different agricultural needs, making them extremely useful for the development of precision agriculture.

The introduction of such technologies helps not only to preserve natural resources but also to improve the economic efficiency of agriculture. Therefore, the development and implementation of cyber-physical systems for soil monitoring is an extremely important step for the sustainable development of Ukraine's agricultural sector. Therefore, our research is devoted to the development of a method and a cyber-physical system for determining soil parameters.

The cyber-physical system for determining soil parameters consists of three levels: the level of sensors, the level of the controller to which the sensors are connected, and the system for collecting, monitoring, and managing data in real time. To build a cyber-physical system for determining soil parameters, we selected sensors, selected a controller, selected a data transmission standard, and developed a method for collecting, monitoring, and controlling data. The proposed method of data acquisition, monitoring and control for the upper level of the cyber-physical soil parameterization system allows for efficient data acquisition, monitoring and control in a cyber-physical system with various parameters stored in real time.

References

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. A novel web based application for storing, managing and sharing geotechnical data, illustrated using the national soft soil field testing facility in Ballina, Australia / J. P. Doherty et al. Computers and Geotechnics. 2018. Vol. 93. P. 3–8.
3. Determination of fine-grained soil parameters using an automated system / I. Marzouk et al. Cone Penetration Testing 2022. London, 2022. P. 540–545.
4. Mayne P. W. Stress History of Soils from Cone Penetration Tests. Soils and Rocks. 2017. Vol. 40, no. 3. P. 203–216.
5. Robertson P. K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 53, no. 12. P. 1910–1927.
6. Palágyi Š., Štamberg K., Vopálka D. A simplified approach to evaluation of column experiments as a tool for determination of radionuclide transport parameters in rock-groundwater or soil-groundwater systems. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2015. Vol. 304, no. 2. P. 945–954.
7. Determination of SAR System Parameters Constraints from a Soil Moisture Retrieval Scheme / F. Grings et al. 2016 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, CO, USA, 31 July – 4 August 2016. 2016.
8. Uncertainty's Effects Assessment and the Relevant Parameters on Soil-Pipe Interaction (SPI) System Responses Using Sobol Sensitivity Analysis / C. Bacha et al. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2024.
9. Binh N. V., Duc T. T., Hoa H. T. T. Assessment of Soil Quality Parameters under Rice and Maize Cropping Systems in Hilly Region of Central Vietnam. Indian Journal Of Agricultural Research. 2024.
10. Valentina-Daniela B., Simona-Elena I., Ancuța P.-N. Advanced Autonomous System for Monitoring Soil Parameters. Technologies. 2025. Vol. 13, no. 1. P. 38.
11. Blessing S., Giering R., van der Tol C. OptiSAIL: a system for the simultaneous retrieval of soil, leaf, and canopy parameters and its application to Sentinel-3 Synergy (OLCI+SLSTR) top-of-canopy reflectances. Science of Remote Sensing. 2024. P. 100148.
12. Data set on soil physicochemical parameters, biomass accumulation and carbon credit generation in different management systems in Rio Verde, GO, Brazil / A. Thomazini et al. Data in Brief. 2024. P. 110682.
13. Sengar K. P., Chandrasekaran K. Grounding Systems Transient with Frequency Dependent Soil Parameters: A Time Domain Approach. 2024 IEEE 3rd International Conference on Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), Bhopal, India, 21–22 June 2024. 2024. P. 1–6.
14. 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.
15. Perfection of an Energy-Economic and Environmental Parameters of the Ground Source Heat Pump Systems with Preventing Freezing of the Soil around Ground Pipes / A. Denysova et al. Problems of the Regional Energetics. 2024. No. 2(62). P. 107–120.
16. Moradi M. Comparison of Different Approaches for Incorporating Frequency Dependence of Soil Parameters in Time Domain Simulation of Grounding System. IEEE Transactions on Power Delivery. 2024. P. 1–13.
17. Temperature and Soil Parameter Monitoring System / P. U. Sharma et al. Recent Advances in Civil Engineering for Sustainable Communities. Singapore, 2024. P. 385–393.
18. Doan M.-T., Chen S.-S., Shi J.-Y. A Lumped-Parameter Model for Soil-Pile-Foundation Systems Undergoing Horizontal-Rotational Motions Based on Multiobjective Optimization. Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore, 2023. P. 981–989.

19. Environmental and Soil Parameters for Germination of Leaf Spot Disease in the Groundnut Plant using IoT Enabled Sensor System / P. Garg et al. IEEE Sensors Letters. 2023. P. 1–4.
20. The effectiveness of the multi-soil-layering system in reducing pollutant parameters of crumb rubber industrial wastewater / S. R. P. Primandari et al. Teknomekanik. 2023. Vol. 6, no. 2. P. 122–135.
21. Soetedjo A., Hendrianti E. Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 20. P. 11294.
22. The Effect of Reduced and Conventional Tillage Systems on Soil Aggregates and Organic Carbon Parameters of Different Soil Types / E. Tobiašová et al. Agriculture. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 818.
23. AgriLink. Agricultural Knowledge: Linking farmers, advisors and researchers to boost innovation. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/727577>.
24. Make the smartest irrigation decisions with SoilSense. URL: <https://soilsense.io/>.
25. Sentek: Your soil moisture monitoring specialists for smarter irrigation. URL: <https://sentektechnologies.com/>.
26. SmartField Technologies. URL: <https://smartfield.tech/>.
27. FieldClimate: The robust and powerful platform for all your AG decision needs. URL: <https://metos.global/en/fieldclimate/>.
28. iSyst (Smart Soil Monitoring System). URL: <https://isyst.de/en/>.
29. Yaici W., Entchev E., Longo M. Internet of Things (IoT)-Based System for Smart Home Heating and Cooling Control. 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Prague, Czech Republic, 28 June – 1 July 2022. 2022.

Yurii Voichur Юрій Войчур	PhD, Senior Lecturer of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University ORCID: 0000-0003-3085-7315 E-mail: voichury@khmmu.edu.ua	Доктор філософії, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет
Ilya Rayonk Ілля Районк	Master Student of Computer Engineering & Information Systems Department, Khmelnytskyi National University E-mail: ipay@ukr.net	Магістрант кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем, Хмельницький національний університет

ДОДАТОК Б
(обов'язковий)

ПРЕЗЕНТАЦІЯ ДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Студент Ілля ПАЙОНК

Керівник д.ф., ст. викл. Юрій ВОЙЧУР

- **Мета кваліфікаційної роботи** – автоматизація процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту
- **Об'єкт дослідження** – процес визначення параметрів ґрунту
- **Предмет дослідження** – метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

- **Наукова новизна отриманих результатів:** вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, що відрізняється від існуючих аналогів зниженими витратами на впровадження, спрощеним процесом експлуатації та забезпечує високоефективний збір, моніторинг і керування даними різних параметрів із їх збереженням у режимі реального часу.
- **Практична значущість отриманих результатів** полягає у реалізації кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту, яка забезпечує ефективний збір, моніторинг і керування даними в кіберфізичній системі з різними параметрами, що зберігаються в реальному часі.

Публікація

За темою кваліфікаційної роботи прийнята до публікації одна стаття у фаховому науковому журналі України категорії Б (додаток А):

- Yu. Voichur, I. Payonk. Cyber-physical system for determining soil parameters. Computer systems and information technologies. 2025. №2.

Актуальність дослідження

- Актуальність визначення параметрів ґрунту має велике значення в ряді наукових та практичних галузей, оскільки ґрунти є основою для сільського господарства, екології та будівництва.
- Аналіз параметрів ґрунту є важливою частиною моніторингу екологічного стану територій.
- Визначення параметрів ґрунту є основою для правильного управління природними ресурсами та сталого розвитку.
- Отже, визначення параметрів ґрунту є необхідним для забезпечення сталого розвитку, оптимізації сільськогосподарської діяльності, а також для екологічної безпеки та збереження природних ресурсів.

Постановка задачі

Для розроблення кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту слід розв'язати наступні задачі:

- аналіз відомих методів та рішень для визначення параметрів ґрунту;
- моделювання процесу визначення параметрів ґрунту;
- розроблення методу збору, моніторингу та керування даними для визначення параметрів ґрунту;
- розроблення архітектури кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту;
- проведення експериментів із використанням розробленої кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

Вибір складових частин кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

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



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



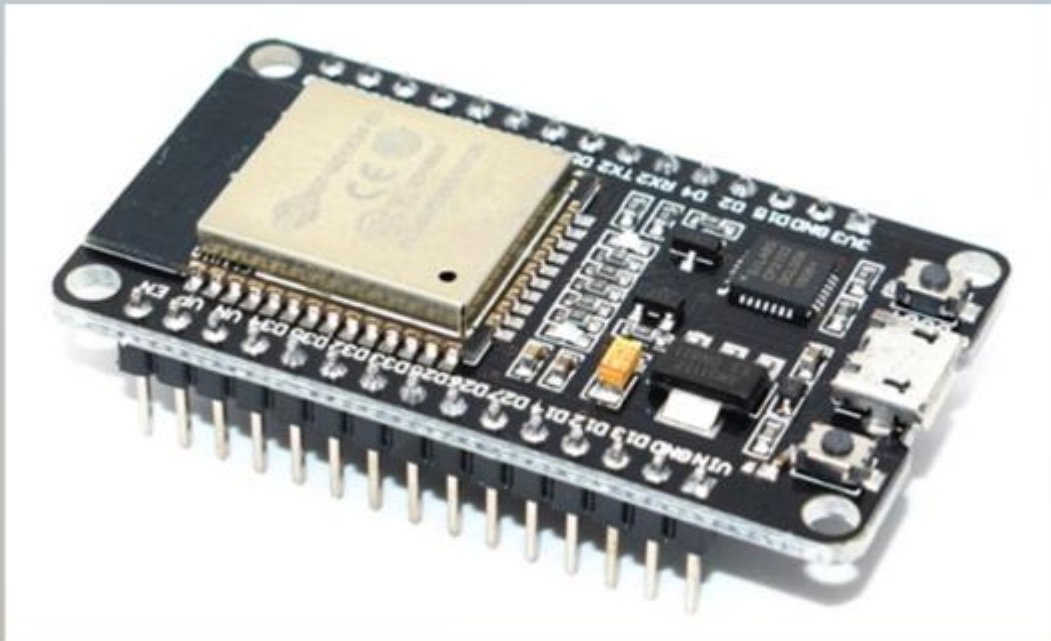
Датчик Eijkelkamp Soil Moisture Sensor для вимірювання текстури (щільності) ґрунту



Датчик Bluelab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту

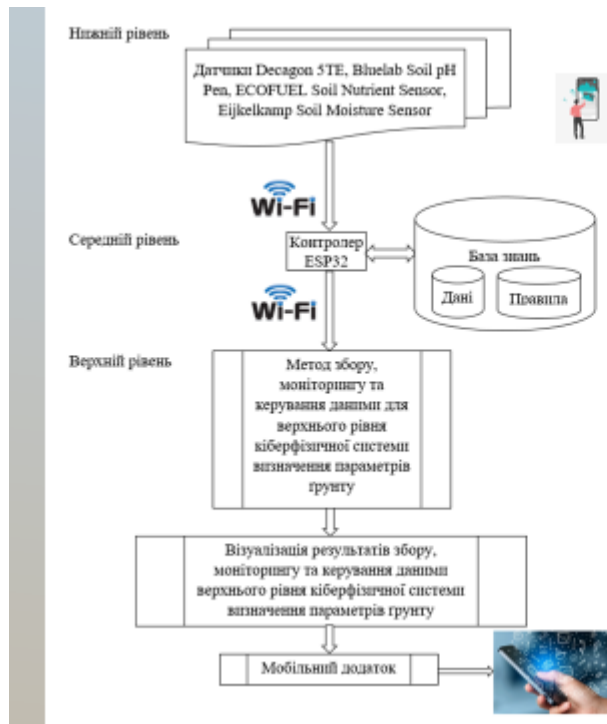


Контролер ESP32



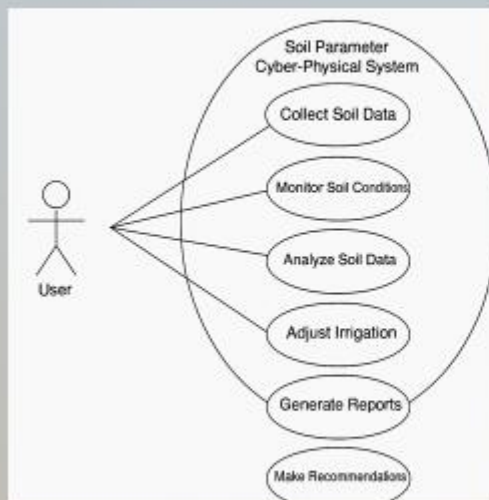
Метод збору, моніторингу та керування даними для верхнього рівня кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту:

- 1) ініціалізація системи – завантаження конфігурації; підключення до контролерів середнього рівня; перевірка працездатності датчиків;
- 2) збір даних з датчиків – опитування сенсорів; збір даних; перевірка якості даних;
- 3) обробка даних на середньому рівні – фільтрація та обробка; миттєвий аналіз; передача результатів на верхній рівень;
- 4) моніторинг та візуалізація на верхньому рівні – збір та збереження даних; візуалізація; моніторинг у реальному часі;
- 5) аналіз та прийняття рішень – виявлення аномалій та порогових значень, алгоритми керування, підтримка рішень на основі штучного інтелекту;
- 6) інтерфейс для користувача – управління, аналіз даних;
- 7) автоматизоване реагування на події – автоматичне коригування параметрів, надсилання попереджень;
- 8) аналіз та зберігання результатів – після збору і моніторингу даних можна виконувати аналіз для вдосконалення роботи системи, а також використовувати історичні дані для визначення найкращих умов роботи або вдосконалення моделі.

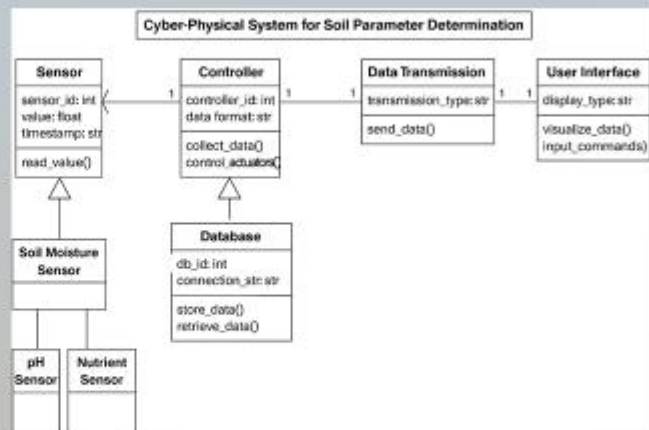


Архітектура кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Діаграма варіантів використання кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту



Діаграма класів кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту



Приклад роботи кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту

Маємо фермерське господарство, яке вирощує кілька видів овочів на відкритих полях. Для покращення управління поливом і удобренням, а також для моніторингу стану ґрунту, фермер вирішує впровадити кіберфізичну систему, яка використовує датчики для вимірювання різних параметрів ґрунту.

Фермер встановлює датчики Decagon 5TE на кількох точках поля, щоб вимірювати вологість, температуру та електропровідність ґрунту. Ці датчики дають змогу точно визначити рівень вологості ґрунту в кожній точці, що дозволяє оптимізувати полив. Водночас на кількох ділянках землі встановлюються Bluelab Soil pH Pen для вимірювання кислотності ґрунту, що важливо для коректного вибору добрив і забезпечення здоров'я рослин. Для точного визначення вмісту поживних речовин (азот, фосфор, калій) фермер також встановлює ECOFUEL Soil Nutrient Sensor, що дає можливість оперативно коригувати внесення добрив. Для вимірювання щільності ґрунту, що важливо для оцінки аерації та водопроникності, фермер використовує Eijkelkamp Soil Moisture Sensor.

Дані з усіх датчиків збираються і передаються через контролер ESP32. Цей контролер є енергоефективним і підтримує бездротові з'єднання, що дозволяє забезпечити постійний моніторинг стану ґрунту без необхідності прокладати кабелі. За допомогою Wi-Fi стандарту, всі дані передаються на центральний сервер або в хмару для подальшої обробки.

Програмне забезпечення на сервері або в хмарі отримує дані від датчиків у реальному часі. Всі виміряні параметри (вологість, температура, рН, 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. Якщо значення параметрів ґрунту знаходяться поза межами оптимальних для вирощуваних рослин, система видає рекомендації або попередження.

На основі аналізу даних система надає фермеру рекомендації щодо коригування агротехнічних заходів. Наприклад, якщо вологість ґрунту низька, система може запропонувати поливати поле, а якщо рН занадто кисле, порекомендувати застосувати лужне добриво.

Усі рекомендації та стан ґрунту можуть бути виведені на мобільний додаток або веб-інтерфейс, через який фермер має доступ до даних у реальному часі.

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. В кінцевому результаті, фермер може не лише значно знизити витрати на воду і добрива, але й підвищити врожайність завдяки точному моніторингу та корекції параметрів ґрунту.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень забезпечено автоматизацію процесу визначення параметрів ґрунту, зокрема, вологості ґрунту, температури ґрунту, електричної провідності ґрунту, кислотності (рН) ґрунту, вмісту поживних елементів (азот, фосфор, калій) та органічних речовин і мінералів в ґрунті, текстури (щільності) ґрунту шляхом створення кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

- У розділі 1 кваліфікаційної роботи проведений аналіз відомих методів та рішень визначення параметрів ґрунту.
- У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту та вибір стандарту передачі даних.
- В розділі 3 розроблено метод визначення параметрів ґрунту, який становить основу кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.
- В розділі 4 кваліфікаційної роботи спроектовано вдосконалену архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Ілля ПАЙОНК

Співавтор:

Назва: Пайонк_Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 5.5%

Коефіцієнт подібності 2: 0.6%

Мікропробіли: 65

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2025-05-05 05:31:10.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☒ Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

☐ Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

☐ Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-05-05

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Anti-Plagiarism v-15.274 Educational

The maximum coincidence with one document 0.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. Errors in the documents: 7%

ID: 240805 Title: МКР Метод та кібєрфізична система визначення параметрів ґрунту Added in a DB: 2025-05-05 Authors: Ілля ПАЙОНІК Heads: Юрій ВОЙЧУР Consultants: Opponents:		Document		Sum coincidence on the DB	
		Symbols	Lexemes	Symbols	Lexemes
		127356	799	1716 (1%)	22 (3%)
Plagiarism sources					
ID	Description	Plagiarism presence in the document			
		Symbols		Lexemes	

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Пайонк Ілля Сергійович

Тема: Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки _____

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є автоматизація моніторингу ґрунтів шляхом розроблення методу та кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У розділі 1 проведений аналіз відомих методів та рішень визначення параметрів ґрунту. У розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір датчиків для формування кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. Крім цього, у розділі 2 кваліфікаційної роботи виконано вибір контролера для кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту та вибір стандарту передачі даних. В розділі 2 кваліфікаційної роботи також розроблені правила для прийняття рішень щодо визначення параметрів ґрунту. В розділі 3 розроблено метод визначення параметрів ґрунту, який становить основу кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту. В розділі 4 кваліфікаційної роботи вдосконалено архітектуру кіберфізичної системи визначення параметрів ґрунту.

4. Позитивні сторони роботи: розроблення методу та архітектури кіберфізичної системи

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага моделюванню роботи системи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з діючими стандартами оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на середньому науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: добре/С (3.75).

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи) Бармак О.В.,
д.т.н., проф., зав. каф. КН ХНУ

“ ” _____ 2025 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри КІПС
д-ру філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

ПАЙОНКА Іллі Сергійовича

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2М-23-2

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті», згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02 травня 2025 року



РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод та кіберфізична система визначення параметрів ґрунту

Автор: Пайонк Ілля Сергійович

Спеціальність: 123 – Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-наукова

Науковий керівник: Войчур Юрій Олексійович, д.ф, старший викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріплення запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 3) найбільшу схожість встановлено з одним документом (статтею Effects of the water content and grain size on soil-cutting tools interactions: implications of LCPCabrasion test) і становить вона 1.04%;
- 4) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості, складає 5.47% і адресується до 41 першоджерела, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи



Ю. О. Войчур

Гарант ОНП



О. С. Савенко

Завідувач кафедри КІІС



О. О. Павлова