

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти Перший (бакалаврський)

Розроблення системи автоматизації аналізу ґрунту
на базі технології Інтернету речей
(тема)

Виконала:
здобувачка 4 року навчання,
групи АКТСІ-21-1
Ірина НАДЬОЖКІНА
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА
(посада, власне ім'я, прізвище)

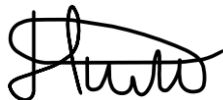
Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____ Ігор НЕВЛЮДОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Надьожкіна Ірина Михайлівна, як здобувачка вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовувала штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«7» червня 2025 р.



Ірина НАДЬОЖКІНА

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
Освітня програма Системна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Надьожкіній Ірині Михайлівні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення системи автоматизації аналізу ґрунту на базі технології Інтернету речей
затверджена наказом університету від 19 травня 2025 р. № 391 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи Дані про існуючі автоматизовані системи аналізу ґрунту, дані про методи, засоби та технології аналізу ґрунту, середовище розробки Visual Studio Code, мова програмування Python
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 1) Огляд і аналіз методів, засобів та технологій існуючих автоматизованих систем аналізу ґрунту
 - 2) Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи автоматизації аналізу ґрунту
 - 3) Комп'ютерне моделювання передавальної функції живлення системи
 - 4) Реалізація системи автоматизації аналізу ґрунту у вигляді програмного засобу
 - 5) Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint(*.pptx) формату А4 – 13 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання до кваліфікаційної роботи	28.04.2025	виконано
2	Вступ	28.04-30.04.2025	виконано
3	Огляд і аналіз методів, засобів та технологій існуючих автоматизованих систем аналізу ґрунту	01.05-10.05.2025	виконано
4	Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи аналізу ґрунту	11.05-18.05.2025	виконано
5	Реалізація системи автоматизації аналізу ґрунту у вигляді програмного засобу	18.05-30.05.2025	виконано
6	Охорона праці	03.06.2025	виконано
7	Висновки	04.06.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	06.06.2025	виконано
9	Подання роботи на нормоконтроль	07.06.2025	виконано
10	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	09.06.2025	виконано
11	Подання роботи на рецензію	14.06.2025	виконано
12	Подання роботи на підпис зав. кафедри	15.06.2025	виконано
13	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	17.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувачка _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

Ірина НАДЬОЖКІНА

(власне ім'я, прізвище)

доц. Софія ХРУСТАЛЬОВА

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 83 с., 9 табл., 46 рис., 6 дод., 56 джерел.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, АНАЛІЗ ҐРУНТУ, МІКРОКОНТРОЛЕР, ІОТ, ДАТЧИК, ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ.

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності аналізу вмісту ґрунту шляхом розроблення системи автоматизації, яка дозволяє визначити фізико-хімічні характеристики ґрунту.

Об'єктом розробки є процес аналізу ґрунту з метою моніторингу та оцінки його стану для відповідних культур.

Предметом розробки є програмний засіб для оцінки стану ґрунту та побудови рекомендацій щодо обрання культур.

В першому розділі було проаналізовано існуючі автоматизовані системи аналізу ґрунту, методи та технології, які вони використовують.

В другому розділі було розроблено структурну схему системи автоматизації аналізу ґрунту, обрано компоненти системи, розроблено схему підключення компонентів до мікроконтролера, розроблено апаратну частину системи, створено алгоритм роботи. Також, розраховано час роботи системи від акумулятора та від сонячної батареї, оцінено стійкість системи та побудовано передавальну функцію живлення.

В третьому розділі було обрано середовище та мову програмування, реалізовано системи автоматизації у вигляді програмного засобу.

В четвертому розділі визначено можливі ризики при використанні системи, описано заходи техніки безпеки.

У результаті роботи розроблено систему автоматизації аналізу ґрунту, яку реалізовано у вигляді програмного засобу.

Отримані результати відповідають переліку Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 2 Подолання голоду, досягнення продовольчої безпеки, поліпшення харчування і сприяння сталому розвитку сільського господарства.

THE ABSTRACT

Explanatory note: 83 p., 9 tables, 46 fig., 6 add., 56 sources.

AUTOMATION SYSTEM, SOIL ANALYSIS, MICROCONTROLLER, IOT, SENSOR, SOFTWARE.

The purpose of the work is to increase the efficiency of soil content analysis by developing an automation system that allows determining the physicochemical characteristics of the soil.

The object of the development is the process of soil analysis in order to monitor and assess its condition for the relevant crops.

The subject of the development is a software tool for assessing the condition of the soil and building recommendations for crop selection.

In the first chapter existing soil analysis automation systems, methods and technologies they use were analyzed.

In the second chapter a structural diagram of the soil analysis automation system was developed, system components were selected, a diagram of connecting components to a microcontroller was developed, the hardware part of the system was developed, and an operation algorithm was created. Also, the operating time of the system from the battery and from the solar panel was calculated, the stability of the system was assessed, and the power transfer function was built.

In the third chapter the programming environment and language were selected, and the automation system was implemented in the form of a software tool.

In the fourth chapter possible risks when using the system were identified, and safety measures were described.

As a result of the work, a soil analysis automation system was developed, which was implemented in the form of a software tool.

The obtained results align with the Sustainable Development Goals, particularly Goal 2 Zero Hunger – achieving food security, improving nutrition, and promoting sustainable agriculture.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	9
Вступ.....	10
1 Огляд і аналіз існуючих методів, засобів та технологій автоматизованих систем аналізу ґрунту	12
1.1 Методи аналізу ґрунту	12
1.1.1 Фізичні методи	12
1.1.2 Хімічні методи.....	18
1.1.3 Фізико-хімічні методи.....	19
1.1.4 Мікробіологічні методи.....	20
1.2 Технології аналізу ґрунту	22
1.3 Сучасні автоматизовані системи аналізу ґрунту	29
2 Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи системи автоматизації аналізу ґрунту	34
2.1 Розроблення структурної схеми системи автоматизації аналізу ґрунту..	34
2.1.1 Розроблення алгоритму роботи системи	36
2.2 Вибір компонентів системи автоматизації аналізу ґрунту.....	39
2.2.1 Вибір мікроконтролера	40
2.2.2 Вибір датчика.....	43
2.2.3 Вибір живлення	47
2.3 Розроблення апаратної частини системи автоматизації	50
2.4 Комп'ютерне моделювання передавальної функції живлення системи	56
2.4.1 Розрахунок часу роботи системи від акумулятора та сонячної батареї.....	56
2.4.2 Оцінка стійкості системи.....	58
3 Реалізація системи автоматизації аналізу ґрунту у вигляді програмного забезпечення.....	61

3.1 Вибір середовища програмування.....	61
3.2 Розроблення програмного засобу	63
4 Охорона праці	74
Висновки	76
Перелік джерел посилання	77
Додаток А Апробація результатів роботи	84
Додаток Б Програмний код підключення датчика до мікроконтролера та передачі даних у BLYNK.....	92
Додаток В Основний код програмного засобу системи автоматизації аналізу ґрунту у VS CODE.....	97
Додаток Г Код логіки аналізу програмного засобу системи автоматизації аналізу ґрунту у VS CODE.....	118
Додаток Д Код програмного засобу системи автоматизації аналізу ґрунту у VS CODE для машинного навчання	140
Додаток Е Демонстраційний матеріал	147

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АСУТП – автоматизовані системи управління технологічними процесами;
АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;
БпЛА – безпілотний літальний апарат;
ГІС – географічні інформаційні системи;
ДЗЗ – дистанційне зондування землі;
ЕС – електропровідність;
ІЧ – інфрачервоний;
ПЗ – програмне забезпечення;
GNSS – супутникові системи навігації;
GPS – глобальні системи позиціонування;
НМІ – людино-машинний інтерфейс;
IoT – Internet of Things;
LoRaWAN – Long Range Wide Area Network;
TTN – The Things Network;
VS Code – Visual Studio Code.

ВСТУП

Наразі людство автоматизує дедалі більше процесів на виробництвах, підприємствах, а також в не менш важливій галузі економіки – сільському господарстві, що здавна вважається складною фізично. З тим, як швидко розвиваються технології і дозволяють підвищити продуктивність процесів збору врожаю чи його посіву, зрошування, в цілому внести покращення у аналіз ґрунту, – ефективності та стабільності можна буде досягти за менший проміжок часу. В Україні ж впровадження подібних систем автоматизації поступово набирає обертів.

Інтернет речей (IoT), а також інші сучасні технології, допомагають зробити взаємодію між задіяними в сільському господарстві пристроями – різними датчиками, безпілотними літальними апаратами (БпЛА), тракторами тощо – зручнішою, також спрощуючи аналіз, моніторинг стану ґрунту або ж визначення можливих для росту культур за допомогою отриманих даних.

Мета роботи – підвищення ефективності аналізу вмісту ґрунту шляхом розроблення системи автоматизації, яка дозволяє визначити фізико-хімічні характеристики ґрунту;

Об’єкт розробки – процес аналізу ґрунту з метою моніторингу та оцінки його стану для відповідних культур;

Предмет розробки – програмний засіб для оцінки стану ґрунту та побудови рекомендацій щодо обрання культур.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення такі завдання:

- провести аналіз методів, засобів та автоматизованих систем аналізу ґрунту;

- розробити структурну схему та алгоритм роботи системи автоматизації аналізу ґрунту;

- провести вибір компонентів системи автоматизації аналізу ґрунту;

– обрати мови та середовище програмування для реалізації системи автоматизації аналізу ґрунту у вигляді програмного засобу;

– оформити кваліфікаційну роботу згідно ДСТУ 3008:2015 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» [2].

1 ОГЛЯД І АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ ТА ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ АНАЛІЗУ ҐРУНТУ

1.1 Методи аналізу ґрунту

Будь-яке поле має різні властивості та характеристики, серед таких параметрів можна виділити особливо важливі: тип і структура ґрунту, кислотність, рівень забезпеченості поживними речовинами, особливості зрошення, здатність тієї чи іншої ділянки протистояти шкідникам тощо. У сукупності, ці та ряд інших параметрів визначають подальшу долю земельної ділянки, тобто, наскільки ґрунт придатний до вирощування певної культури. І так як одне поле – не означає однакові характеристики по усьому периметру, потреба у аналізі конкретних ділянок залишається. З року в рік культури на одному й тому ж полі змінюються, відбувається сівозміна, тому час є не останнім по важливості фактором для ґрунту. Для адаптації до цих змін і задоволення всіх вимог, зростає інтерес до впровадження інноваційних технологій на основі здавна працюючих методів [3]. Точне землеробство цим і займається.

Залежно від мети, методи аналізу ґрунту можна умовно класифікувати на фізичні, хімічні, фізико-хімічні і мікробіологічні, що сприяють задоволенню різних потреб аграріїв [4]. Вони також поділяються за характером вимірюваних параметрів і способом впливу.

1.1.1 Фізичні методи

Фізичні методи застосовуються для оцінки вологості, щільності, теплофізичних, електричних і магнітних властивостей ґрунту [5].

Одним з головних параметрів є оцінка вологості, що у подальшому застосовується для розрахунку інших показників, наприклад, водозабезпеченості рослин чи оптимальних умов для їхнього росту. Найточнішим пристроєм для визначення вологості є тензіометр (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Тензіометр IRRROMETER SR

Тензіометр у більшості представляє собою скляну або пластикову трубку, що має пористу керамічну чашку на кінці. У верхній частині тензіометра зазвичай розміщено або вбудований вакуумметр, або спеціальний гумовий ковпачок, який використовують разом із портативним пристроєм – пункційним тензіометром, який оснащено тонкою голкою, аналогічно до тієї, що застосовують у медицині для підшкірних ін'єкцій. За допомогою цієї голки вимірюється тиск усередині, що дозволяє оцінити рівень вологості ґрунту. Пристрій занурюють у ґрунт без додаткового зволоження, після чого ручним насосом створюють частковий вакуум, тому у випадку зволоженого ґрунту, вакуум зменшується за рахунок витягування трубкою вологи. І якщо у результаті тиск води у пристрої однаковий з тиском води у ґрунту, тензіометр показує, наскільки сильно ґрунт утримує вологу [6].

Перевагами цього методу є доступність через невисоку вартість, а також точність вимірювання. Але недоліком тензометричного методу є потреба у базових знаннях про фізичні властивості ґрунтів, зокрема про їхню гігроскопічність та здатність утримувати або втрачати вологу залежно від кліматичних умов і структури, тому що один і той самий показник вологості може по-різному впливати на різні типи ґрунтів. Наприклад, піщаний ґрунт втрачає

вологу значно швидше, ніж глинистий [7]. Також періодично потрібно доливати воду у пристрій, тобто, повинне бути регулярне обслуговування, а взимку є шанс змерзання, тому їх краще не використовувати в такий період на постійній основі.

Сучасні датчики вимірювання вологості частіше засновані на діелектричному методі, тобто, на зміні діелектричної проникності. Чим більше вміст води, тим більше діелектрична проникність. На відміну від тензометричного методу, діелектричні датчики вимірюють фактичний вміст води, а не напругу всмоктування води.

Також існують гігрометри, вони наразі є ще поширенішим рішенням. Вони ж працюють за методом електричного опору, що вимірюється двома зондами, які проводять струм. Менший опір означає більший показник вологості у ґрунті. На рисунку 1.2 показано типовий вигляд гігрометру.



Рисунок 1.2 – Вигляд гігрометру від компанії Xiaomi

Для оцінки щільності використовують пенетромтр, або як ще його називають – щільномір. Щільність є також важливим параметром, бо в процесі обробки за допомогою важкої сільськогосподарської техніки структура ґрунту погіршується за рахунок створюваного тиску. Маленькі частинки ґрунту

ущільнюються, зменшується кількість повітряних порожнин між ними. Це призводить до поганої водопроникності ґрунту і може серйозно заважати нормальному розвитку кореневої системи рослин [8].

Принципом роботи пенетрометра є поступове занурювання металевого стрижня з нержавіючої сталі з наконечником у формі конусу, таким чином під час проникнення у ґрунт, прилад фіксує силу, необхідну для просування наконечника, що відображає опір ґрунту [9].

Його конструкція зазвичай включає вертикальний шток зі стандартним наконечником, вимірювальну шкалу, ручки для зручності вводу в ґрунт (рис. 1.3). Метод також є простим у використанні, але, як і тензіометр, залежить від вологості та типу ґрунту.



Рисунок 1.3 – Щільномір «WILE SOIL»

Сучасні рішення ж для визначення щільності використовують різні методи: від електромагнітної провідності (ЕМП) ґрунту до вимірювання ультразвукових хвиль.

ЕМП вимірюється за допомогою датчиків, що генерують електромагнітне поле і посиляють електромагнітні сигнали. Від значення вологості та щільності, самого складу ґрунту, він буде по-різному проводити сигнали.

Існують радіометричні датчики, що використовують гамма випромінювання. Чим щільніший ґрунт, тим менше променів доходить через джерело випромінювання до детектора.

Ультразвукові або акустичні датчики генерують ультразвуковий імпульс, що поширюється у ґрунті, та вимірюють час проходження хвилі. Як і в інших методах, результати залежать від властивостей ґрунту. Тому щільні ґрунти мають вищу швидкість того, як буде поширюватися звук, у той час і можуть сильніше цей сигнал відбивати.

Щоб визначити теплофізичні параметри, а саме теплоємність, теплопровідність і температуропровідність, використовуються терморезистори, термомпари і термодатчики. Основний принцип їхньої дії полягає у властивості матеріалів провідників та напівпровідників змінювати свій питомий електричний опір залежно від температури навколишнього середовища [10]. Завдяки цій особливості, пристрої можуть точно реєструвати коливання температурного режиму ґрунту, що в подальшому дає змогу здійснювати розрахунки теплообмінних процесів. Наприклад, для вимірювання теплопровідності та питомого теплового опору застосовують портативний вимірювальний прилад TLS-100 (рис. 1.4), що складається з тонкого нагрівального елемента та датчика температури, запечатаного в сталеву трубку діаметром 50 мм, 100 мм або 150 мм. Під час вимірювання тепло передається в ґрунту за допомогою постійного електричного струму, а зміни температури фіксуються впродовж певного часу [11]. Це дозволяє точно визначити теплові характеристики ґрунту у конкретній ділянці. Однак, точність вимірювань залежить від стабільності температури та якості контакту з ґрунтом.



Рисунок 1.4 – Вимірювальний прилад TLS-100

Електричні властивості, тобто, електропровідність (ЕС) ґрунту – це властивість ґрунту передавати електричний струм. За допомогою кондуктометрів (рис. 1.5) можна визначити вміст розчинених солей і саму ЕС. Рівень ЕС ґрунту значною мірою залежить від вмісту води. Як вже було згадано раніше, чим більше води у ґрунті, тим вища його провідність, тому піщані ґрунти зазвичай мають низьку ЕС через великі пори й слабе утримання води. Натомість мулисті ґрунти демонструють середній рівень провідності, глинисті ж – найвищий, оскільки вони здатні на добре утримання води [12]. Метод швидкий і не потребує складного обладнання, однак результати можуть бути неточними на дуже сухих або сильно засолених ділянках.



Рисунок 1.5 – Кондуктометр EC-3185 з виносним електродом

1.1.2 Хімічні методи

Хімічні методи потрібні для того, щоб визначити у ґрунті вміст поживних речовин.

Для цього є NPK-сенсори (рис. 1.6), що використовують спектроскопію ближнього інфрачервоного (ІЧ) та середнього ІЧ діапазонів. Ці датчики випромінюють світло на ґрунт і аналізують пропущені або відбиті спектри. Різні поживні речовини поглинають і відбивають світло особливо, формуючи унікальні візерунки, через які їх визначають. Аналізуючи спектр, датчик може визначити концентрацію Азоту (N), Фосфору (P) та Калію (K) [13].

ІЧ спектроскопія базується на аналізі у молекулах коливального руху атомів, тобто, яким чином атоми всередині молекули взаємодіють між собою під впливом ІЧ випромінювання [14]. Коли молекули ґрунтових речовин поглинають ІЧ світло, це викликає зміну енергії їхніх коливальних режимів. Отриманий спектр потім є своєрідним «відбитком» молекулярної структури, за яким можна визначити наявність певних сполук чи функціональних груп. Саме завдяки цьому ІЧ-спектроскопія активно використовується для аналізу ґрунту на органічні і мінеральні компоненти, а також для оцінки вмісту гумусу, N, P та інших показників.

Метод є точним, дозволяє не руйнуючи зразок провести вимірювання безпосередньо у полі. Однак, як і у більшості інших сенсорів, точність може знижуватися через вплив вологи, структури ґрунту або сторонніх домішок.



Рисунок 1.6 – NPK-сенсор

1.1.3 Фізико-хімічні методи

Фізико-хімічні методи поєднують у собі фізичні і хімічні методи, дозволяючи визначити і якісний, і кількісний склад компонентів ґрунту, враховуючи особливості їх фізичної поведінки в хімічних процесах, наприклад, сорбційні властивості, кислотно-лужну буферність, ЕС, іонний обмін тощо.

Електрохімічні датчики здійснюють збір, первинну обробку і навіть візуалізацію у вигляді мап даних щодо хімічного складу ґрунту. Вони допомагають з'ясувати вміст Калію, нітратів, фосфатів, ну і також визначають показник кислотності – рівень рН [15].

Існують Іюноселективні електроди (рис. 1.7), що проводять аналіз у режимі реального часу у польових умовах, при цьому роблять вони це з достатньою точністю. Такі електроди працюють на здатності іонів розподілятися між двома середовищами: ґрунту та спеціальною селективною мембраною. Подібна

мембрана може приймати різні вигляди: тверде тіло; рідкий розчин, що наносять на інертний носій. Коли іони зразка ґрунту взаємодіють із мембраною, тоді на їх межі виникає нерівномірний розподіл заряді, у результаті чого утворюється електричний потенціал, за яким визначають концентрацію потрібного елемента [16]. Це зветься потенціометрією та є найбільш поширеним методом.

Іоноселективні електроди мають високу вибірковість до певних іонів і дозволяють проводити аналіз швидко та в реальному часі як у лабораторії, так і в польових умовах. Вони відносно прості у використанні, але потребують регулярної калібровки та чутливі до змін температури й іонної сили розчину. Крім того, мембрана електрода зношується з часом, а для аналізу різних іонів часто потрібно змінювати електрод.



Рисунок 1.7 – NO_3 , NH_4 , Ca , Cl , K іон-селективні електроди

Сучасні датчики також використовують потенціометричний метод вимірювання.

1.1.4 Мікробіологічні методи

Як у описаних попередньо методах, для них існують датчики, тому є біосенсор – пристрій, що дозволяє виявити концентрацію специфічних

біологічних речовин, так званих аналітів у складних середовищах. Простіше кажучи, це модифіковані електроди, які здатні «відчувати» присутність певних речовин завдяки вбудованим біологічним компонентам – біорецепторам. Вони можуть бути різного типу: антитіла, ферменти, фрагменти ДНК або РНК, білки чи навіть бактерії.

Біосенсор розпізнає біологічні та хімічні реакції, генеруючи спеціальні сигнали, що є пропорційними концентрації аналіту (потрібної для виявлення речовини в реакції [17-18]).

Для перетворення біологічного сигналу на вимірювану електричну відповідь, використовується п'єзоелектричні, електрохімічні та оптичні трансдюсери. Ці сенсори забезпечують високу чутливість, що дозволяє застосовувати їх у мікробіологічному аналізі ґрунті, води, харчових продуктів або біологічних зразків. Прикладом може служити фермент, який викликає зміну кислотності, яку легко фіксує звичайний рН-електрод [19].

Основна перевага біосенсорів у сільському господарстві – це чутливість і точність. Вони здатні виявити навіть мінімальні концентрації речовин, а також працювати у режимі реального часу без потреби у складному лабораторному обладнанні. Тому такі датчики активно використовуються для контролю якості ґрунту, виявлення нестачі поживних речовин і загального моніторингу стану рослин.

Нажаль, недоліки є також. Так як ці біорецептори дуже чутливі, то фактори навколишнього середовища можуть впливати на їх роботу, тому вони можуть не завжди стабільно працювати на відкритому повітрі, якщо не додати який-небудь захист.

До того ж, вартість є ще одним мінусом, бо якісні біорецептори все ще дорогі та щоб їх використовувати на великих полях, потрібно витратити багато коштів. Ще не завжди їх можна знайти у вільному доступі, бо вони продовжують розвиватися.

1.2 Технології аналізу ґрунту

Як вже було сказано раніше, точне землеробство використовує цифрові технології, щоб оптимізувати процеси вирощування будь-яких культур чи задля обробки ґрунту. Сьогодні існує достатньо таких, що допомагають підвищити врожайність і зменшити витрати [20-21]. Вони включають у себе:

- глобальне позиціонування (GPS) та супутникові системи навігації (GNSS);
- географічні інформаційні системи (ГІС);
- дистанційне зондування землі (ДЗЗ);
- IoT.

GNSS включає у собі різні супутникові системи: GPS (США), Galileo (ЄС), BeiDou (Китай) тощо. Ці системи складаються з супутників, наземних станцій та приймачів [22]. Якість та точність визначення координат безпосередньо залежать від кількості супутників, сигнали яких доступні в полі зору приймача: чим їх більше, тим вищою буде просторово-часова точність.

GPS та Galileo дозволяють визначити точні місця відбору зразків ґрунту і деталі вмісту, сприяючи ефективнішому управлінню родючістю; картографувати врожайність або посів, щоб виявляти продуктивні зони та ті, в яких врожайність низка, також і проблемні зони, в яких можуть бути засоленості ґрунту або ж шкідники. Завдяки цьому вдається своєчасно вижити заходів і запобігти втратам врожаю.

Більшість сільськогосподарської техніки – від тракторів до комбайнів – також оснащується GPS та Galileo, це дозволяє планувати маршрути відбору зразків ґрунту, знижуючи витрати пального та знос обладнання, а також негативний вплив на фізичні властивості ґрунту, зокрема на його ущільнення [23].

Як уже зазначалося раніше, уникнення надмірного ущільнення ґрунту є важливим чинником збереження його структури та водопроникності.

Galileo же хоч і схожа по принципу своєї роботи на GPS, але між ними є різниця. Порівняння можна побачити у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння GPS та Galileo

Характеристика	GPS	Galileo
Країна/Організація	США, Міністерство оборони США	ЄС, Європейська комісія, ESA)
Рік запуску	1978 (перша супутникова пара), повна системи – 1995	2011 (перші супутники), початкові послуги стали доступні наприкінці 2016 року
Точність позиціонування без корекції)	10 м	Менше 1 м за ідеальних умов
Максимальна точність з корекцією	До 30 см з RTK	До 20 см з High Accuracy Service
Кількість супутників	31	28 (планується вивести ще 4)
Діапазони частот	L1, L2 і L5 для цивільних і військових сигналів	E1, E5a, E5b, E6. Також пропонується новий сигнал «Galileo Open Service» (OS), що був розроблений для сумісності з GPS

Це порівняння демонструє, що хоча GPS є найстарішою й найбільш широко використовуваною системою, Galileo має переваги у точності, відкритості для цивільного використання та сумісності з іншими навігаційними

рішеннями. Для аграрних, наукових або транспортних потреб Galileo стає все більш привабливою альтернативою або доповненням до GPS.

ГІС дозволяють збирати і аналізувати дані про просторовий стан земельних ділянок та візуалізувати це у вигляді багатопланових інтерактивних мап родючості, вологості, вмісту поживних речовин ґрунтів тощо [24]. До апаратної частини можуть належати різні пристрої: від персональних комп'ютерів до аерокосмічних платформ, як-от дрони чи супутники.

ГІС оперують двома типами просторових даних – векторними та растровими, які суттєво відрізняються за способом зберігання та подання інформації.

У векторній моделі просторові об'єкти представляються у вигляді точок, ліній і полігонів, що описуються наборами координат (X, Y). Розташування одиночного об'єкта задається однією парою координат, а лінійні елементи – дороги, річки тощо, формуються з послідовності точок. А полігональні об'єкти – земельні ділянки, водозбірні басейни чи адміністративні межі задаються у вигляді замкнутого контуру координат. Такий підхід завдяки своїм можливостям активно підходить для відображення дискретних об'єктів, однак менш ефективний при описі неперервних характеристик, тобто, зміни в типах ґрунтів чи рівнях доступності ресурсів.

Натомість, растрова модель є кращою для роботи з безперервними даними, бо базується на поданні простору у вигляді регулярної сітки з однакових за розмірів осередків (пікселів), кожен з яких має певне числове значення, що відображає певну властивість, наприклад, температуру, вологість, висоту рельєфу тощо. Така модель схожа на цифрову фотографію або скановану карту [25]. На рисунку 1.8 представлено порівняння двох моделей.

Кожна з моделей має свої переваги та обмеження, і саме тому більшість сучасних ГІС підтримують одночасну роботу як із векторними, так і з растровими даними, що дозволяє більш гнучко і точно аналізувати просторову інформацію.



Рисунок 1.8 – Порівняння растрової (зліва) та векторної (справа) моделей просторових даних

ДЗЗ включає використання супутникових знімків та даних з БПЛА і дронів, літаків та супутників для моніторингу стану посівів. Ці технології дозволяють виявляти проблемні зони на полі, такі як посушливі ділянки, ураження шкідниками або хворобами, та оперативно реагувати на них.

Ефективність використання ДЗЗ залежить від характеристик платформи, яка здійснює збір даних, на якість зібраної інформації впливають такі фактори, як кількість та ширина спектральних діапазонів, які фіксує датчик (мульт- або гіперспектральну зйомку), а також просторове розпізнавання (високе, середнє або низке), частота отримання зображень (наприклад, щогодини, щодня або щотижня) і радіометрична роздільна здатність (8-, 12- або 16-біт), з якою фіксуються дані [26].

ДЗЗ може бути активним і пасивним в залежності від джерела сигналу.

Активне дистанційне зондування здійснюється за допомогою приладів, які мають власне джерело випромінювання. Такі датчики самостійно генерують сигнал, що після відбиття від об'єкта реєструється приймачем. Найпоширенішими прикладами є радарні та лідарні системи (RADAR і LIDAR), які дозволяють отримувати дані навіть за умов хмарного неба або у темну пору доби.

Пасивне зондування базується на реєстрації відбитого сонячного випромінювання або теплового випромінювання самих об'єктів. Цей тип ДЗЗ є більш поширеним, зокрема у супутниковому моніторингу рослинності, ґрунтів та водних об'єктів, проте він суттєво залежить від умов освітлення та погоди [27].

ІоТ є протоколом передачі даних, він є основою автоматизації та роботизації для сільського господарства та інших галузей. ІоТ охоплює мільярди інтелектуальних пристроїв, які застосовують у різних галузях. Задіяні пристрої автономно взаємодіють, збирають дані та обмінюються ними за допомогою датчиків і актуаторів [28]. Завдяки цій технології стало можливим постійне спостереження за станом ґрунту, кліматичними умовами, рівнем вологості, станом культур тощо.

Найпоширенішими мережевими протоколами є протокол керування передачею (TCP) та Інтернет-протокол (IP), які забезпечують надійний обмін даними. Усі передані дані розбиваються на окремі пакети [29]. У системах ІоТ ці протоколи є основою стабільного та безпечного зв'язку між пристроями.

Усі описані до цього технології і методи використовуються разом з ІоТ, щоб зробити різні системи: автоматичне зрошування, внесення добрив, активацію захисних систем тощо. Зібрані дані з датчиків передаються на сервери чи у хмарне середовище, де автоматизовані алгоритми здійснюють аналіз і формують звіти, рекомендації або запускають певні дії.

Щодо архітектури ІоТ, то вона залежить і може змінюватися від конкретного варіанту впровадження. Один із загальних прикладів архітектури показано на рисунку 1.9.

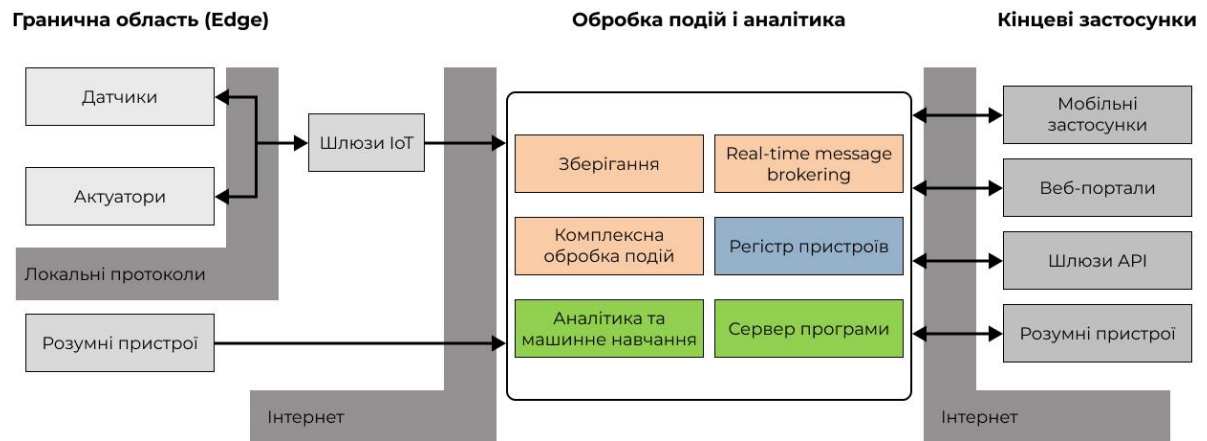


Рисунок 1.9 – Архітектура IoT

У IoT-системах взаємодія з фізичними об'єктами здійснюється за допомогою датчиків та виконавчих пристроїв – актуаторів. Цей принцип дуже схожий на той, що використовується в автоматизованих системах управління технологічними процесами (АСУТП), де датчики передають інформацію про стан об'єкта, а актуатори здійснюють відповідну реакцію на основі керуючих впливів. В IoT саме сенсори та актуатори створюють так звану граничну область (Edge), яка є найближчою до фізичного середовища і забезпечує первинне збирання даних та взаємодію з об'єктом.

Зібрана інформація передається до наступного рівня – обробки подій і аналітики, де й зберігаються, обробляються і аналізуються дані в режимі реального часу та розподіляються між відповідними модулями та застосунками (Real-time message brokering). Крім цього, тут здійснюється керування пристроями на рівні Edge, ведеться облік підключених пристроїв та контроль їхньої роботи. Важливою складовою цього рівня є аналітичні сервіси та модулі машинного навчання, які дозволяють здійснювати прогнозування, виявлення закономірностей та прийняття рішень без участі людини. Зазвичай, ця частина архітектури реалізується із використанням хмарних або туманних обчислень (Cloud/Fog computing), що дозволяє масштабувати системи, підвищити гнучкість і зменшити навантаження на локальні ресурси.

Останнім етапом є кінцеві застосунки, або прикладний рівень, те, що у результаті бачить користувач. Він представлений програмами чи веб-

інтерфейсами, через які здійснюється відображення інформації, віддалене управління, моніторинг та адміністрування всієї IoT-системи. За своєю функціональністю цей рівень відповідає людино-машинному інтерфейсу (НМІ) у класичних системах автоматизації [30].

Комунікаційна складова є критично важливою для ефективного функціонування будь-якої IoT-системи. Незважаючи на наявність широкого спектру протоколів зв'язку, жоден із них не є універсальним і не може повністю задовольнити специфічні вимоги IoT. Серед обмежень, що ускладнюють використання наявних технологій у сфері IoT, виділяють високе енергоспоживання, пропускну здатність і радіус дії [31].

В залежності від вибраного для системи протоколу зв'язку, система може бути як і енергоефективною та оптимізованою для тривалої автономної роботи пристроїв з малим обсягом переданих даних (наприклад, при використанні технології LoRaWAN або NB-IoT), так і високопродуктивною з можливістю передавання великих обсягів інформації у режимі реального часу (наприклад, при застосування Wi-Fi або 5G), що, однак, потребує більшого енергоспоживання та стабільного покриття мережі.

Вибір протоколу зв'язку залежить від конкретних вимог IoT-рішення, таких як дальність зв'язку, частота передачі даних, доступність енергоспоживання та умови експлуатації [32].

У таблиці 1.2 наведено найпоширеніші протоколи зв'язку, що використовуються у IoT-системах.

Таблиця 1.2 – Порівняння характеристик протоколів зв'язку

Стандарт	LoRaWAN	Wi-Fi	Zigbee	Bluetooth	5G
Зв'язок	Власний	802.11	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.1	3GPP
Частота	868 МГц	2,4/5,0 ГГц	2,4 ГГц	2,4 ГГц	24 ГГц

Продовження таблиці 1.2

Стандарт	LoRaWAN	Wi-Fi	Zigbee	Bluetooth	5G
Швидкість передачі	До 290 біт/с	До 150 Мбіт/с	До 250 Мбіт/с	До 3 Мбіт/с	До 10 Гбіт/с
Типологія мережі	Зірка	Зірка	Сітка, зірка	Зірка	Зірка
Дальність	5-15 км	40-1000 м	10-100 м	1-100 м	До 10 км
Кількість учасників мережі	Дуже велике	100	100	До 8 у класичному режимі	Дуже велике
Потужність	Середня	Середня	Низька	Низька	Висока
Спосіб застосування	Мобільний / локальний	Локальний/ високо-швидкісний	Локальний / сенсорні мережі	Локальний/ персональні пристрої	Глобальний/ мобільний

Враховуючи умови, в яких зазвичай знаходяться сільськогосподарські угіддя, доцільно використовувати LoRaWAN, 5G та, можливо, Wi-Fi.

1.3 Сучасні автоматизовані системи аналізу ґрунту

Вибір типу системи безпосередньо впливає на подальшу архітектуру всього рішення. В залежності від потреб, різними можуть бути датчики, методи збору інформації або аналізу ґрунту, виконавчі механізми тощо [33].

Розглянемо декілька вже існуючих систем автоматизації аналізу ґрунту, а саме: Fasal, Climate FielView та SoilReader. Вони відрізняються підходами до збору даних і їх аналізу, технічними компонентами, ступенем автоматизації та можливостями інтеграції.

Принцип роботи Fasal полягає в постійному моніторингу та побудові рекомендацій. Вона є стаціонарною. Система вчиться на зібраних даних за допомогою штучного інтелекту і прогнозує оптимальні параметри зрошення, удобрення, захисту рослин від шкідників та хвороб тощо. Зокрема, Fasal відстежує мікро- і макрокліматичні умови, параметри ґрунту, сонячну радіацію, стадію росту рослин та їх характеристики [34].

Для збору інформації Fasal використовує власні земельні сенсори і метеостанції. Додатково платформа може інтегруватися з публічними даними погоди, супутниковими знімками та даними ґрунтових досліджень. В інтерфейсі користувача у мобільному застосунку та у веб-порталі відображається карта поля з показниками вологості, мікроклімату та рекомендаціями. Результати аналізу потім подаються у вигляді графіків, мап і текстових підказок. Fasal також вміє вести облік аграрних операцій та фінансів [35]. На рисунку 1.10 показано вигляд системи у роботі.



Рисунок 1.10 – Система Fasal

Нажаль, інтеграція з іншими платформами у Fasal обмежена. Теоретично, через мобільний застосунок і серверний API для передачі даних у хмару можна підключати сторонні джерела інформації, наприклад, ті ж самі датчики на

техніці, але це вимагає додаткових зусиль з боку користувача та розробника, бо сама архітектура Fasal більше орієнтована на роботу з власними сенсорами й внутрішніми алгоритмами.

Основними недоліками цієї системи є вартість обладнання та необхідність постійного підключення до Інтернету на ділянці. Також Fasal орієнтована на індійський ринок, тому для адаптації до інших кліматичних регіонів та типів ґрунтів будуть потрібні спеціалісти.

Іншим прикладом є система Climate FieldView. Вона представляє собою електронний пристрій – унікальний реєстратор даних FieldView Drive 2.0, що підключається до комбайна чи сівалки, а також має власний мобільний застосунок FieldView Cab. FieldView Drive збирає та передає дані в режимі реального часу про посів, окрім цього може збирати дані про збір врожаю і робити карти врожайності за допомогою вбудованого GPS і сумісних моніторів на техніці [36]. На рисунку 1.11 показано інтерфейс системи.



Рисунок 1.11 – Інтерфейс системи Climate FieldView

Окрім власних моніторів, система підтримує імпорт даних зі сторонніх джерел, наприклад, історичних. Користувач може завантажити результати аналізу ґрунту з лабораторії або з карт ґрунтових властивостей у вигляді файлу

та використовувати ці дані вже у самому застосунку. Перевагою є те, що FieldView має функцію інтеграції з іншими мережами датчиків, такими як Veris і SoilOptix, що будують карти властивостей ґрунту в реальному часі. Для збору даних система також може використовувати супутникові знімки та погодні моделі, автоматично візуалізуючи та відображаючи їх. Спеціальні адаптери та коннектори дозволяють передавати дані безпосередньо через Bluetooth та GPS [37].

Але недоліки також є, одним з головних є ліцензування, тобто, система працює лише за платною підпискою. Іншим мінусом є необхідність сумісної техніки. Також для детального аналізу FieldView часто використовує сторонні дані, оскільки власні датчики безпосередньо не вимірюють хімічні властивості ґрунту.

Іншою системою є SoilReader для безперервного аналізу ґрунту на ходу. Система складається з оптичного віконцевого елемента, видимого і ближнього інфрачервоного спектрометра та вбудованого комп'ютера для обробки даних. Прилад встановлюється на раму трактора або плуга, його кріплять до ріжучого диска ґрунтообробного агрегату, що входить у землю [38]. Таким чином, при проходженні по полю SoilReader сканує ґрунт безконтактно (рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – SoilReader, розміщений на сільськогосподарській техніці

Принцип роботи SoilReader, як вже було згадано вище, заснований на видимій і ближній інфрачервоній спектроскопії. Кожен раз, коли транспортний засіб рухається, прилад виконує виміри на кількох глибинах одночасно завдяки конструкції диска. У цей час миттєво вимірюються основні важливі показники ґрунту: Азот, Фосфор, Калій, рН, вміст органічної речовини, ЕС, вологість, відсоток глини та піску [39]. Обчислені значення передаються на бортовий комп'ютер і надсилаються в систему збору даних. Результати відображаються через спеціальне ПЗ, візуалізація здійснюється у вигляді карт-поверхонь.

Серед недоліків SoilReader є висока вартість, ще одним мінусом є новизна технології, тому вона ще тестується, через що можуть виникнути непередбачені проблеми та збої. Також для коректної роботи необхідне калібрування на типи ґрунтів регіону. SoilReader потребує спеціальної установки на ґрунтообробному обладнанні, що ускладнює використання системи для дрібних господарств без власних машин.

Незважаючи на плюси і поширеність згаданих систем, усі вони мають обмеження, що роблять їх застосування дещо складнішими. Fasal же хоч і має функції прогнозування та аналізу більшості параметрів ґрунту, та не здатна вдосталь вимірювати хімічний склад. Через це може бути складно приймати рішення про використання добрив. Climate FieldView має проблеми з аналізом, здебільше слугує як засіб для зручної візуалізації даних, отриманих з лабораторій. SoilReader ж суттєво залежить від якості калібрування приладу та умов вимірювання.

Тому виникає потреба в розробці системи, що могла би врахувати незручності існуючих рішень і її впровадження не потребувало великих затрат, вона була би простою у використанні, надійною та не коштувала багато грошей.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТА АЛГОРИТМУ РОБОТИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ АНАЛІЗУ ҐРУНТУ

2.1 Розроблення структурної схеми системи автоматизації аналізу ґрунту

Так як система – це взаємопов’язані між собою елементи, що працюють разом для виконання певного завдання або функції [40], структурна схема є необхідною і важливим етапом проєктування. Вона дозволяє наглядно визначити всі задіяні пристрої та програмні елементи, показати яким чином дані передаються та як зв’язані компоненти системи. З поняття системи випливає вже система автоматизації, що є сукупністю проґрамованих пристроїв, але може без проблем працювати частково або зовсім без участі людини.

На рисунку 2.1 зображено структурну схему системи автоматизації аналізу ґрунту на базі технології IoT.

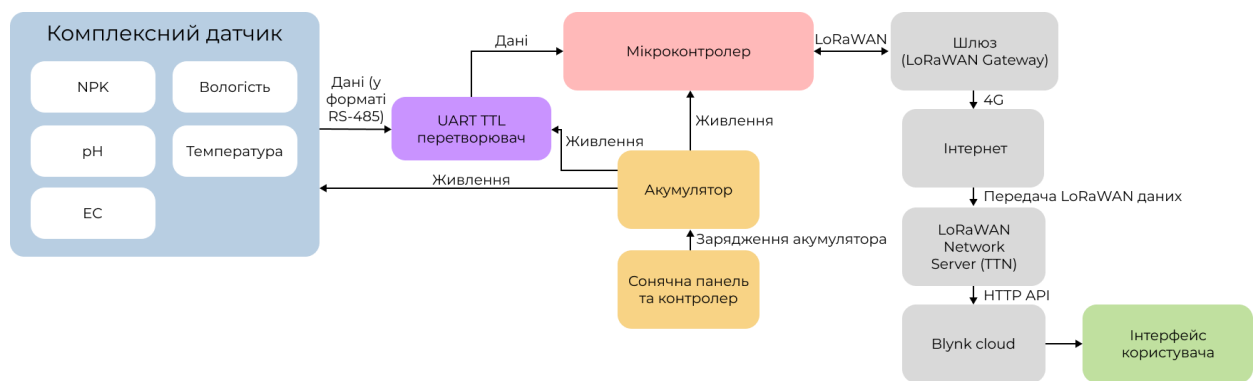


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи автоматизації аналізу ґрунту

Розглянемо кожен блок окремо.

У системі задіяний комплексний датчик, що занурений у ґрунт, він вимірює сім параметрів, а саме:

- поживні речовини N (Азот), P (Фосфор), K (Калій);
- кислотність ґрунту pH;
- електропровідність ґрунту, що вказує на засоленість;

- вологість ґрунту;
- температуру ґрунту.

Мікроконтролер – найважливіша, окрім датчиків, частина системи, яка представляє собою центральний обчислювальний пристрій, що отримує дані від сенсорів, попередньо обробляє їх, а потім передає ці дані далі.

На схемі знизу від мікроконтролера показано джерело живлення, а саме акумулятор, який забезпечує автономну роботу системи в польових умовах. Також він живить сенсори і перетворювач. Сонячна панель виконує роль підзарядки акумулятора від енергії сонця. Контролер запобігає перезаряду акумулятора, що шкодить йому та роботі, також стабілізує напругу, яка може змінюватися за погодним умов та часу доби.

UART TTL перетворювач на схемі зображений для забезпечення сумісності між сенсором, що використовує інтерфейс RS-485 та мікроконтролером, який працює за протоколом UART (TTL-рівень). Цей модуль виконує перетворення диференційованого сигналу RS-485 у послідовний TTL-сигнал, дозволяючи мікроконтролеру правильно зчитувати дані від датчиків.

Шлюз (LoRaWAN Gateway) приймає дані з мікроконтролера за допомогою бездротової технології LoRaWAN та передає їх в мережу Інтернет. Тобто, шлюз можна назвати ретранслятором між Інтернетом та пристроями LoRaWAN. Так як у більшості сільськогосподарських угідь не всюди є Wi-Fi, щоб передати дані далі, використовується мережа мобільного зв'язку 4G, до якої підключений шлюз LoRaWAN.

Інтернет, звичайно, є глобальною мережею, через яку дані передаються на сервер обробки. Після того, як встановлюється з'єднання через 4G, шлюз використовує його для того, щоб дані передалися стандартними інтернет-протоколами на The Things Network (TTN).

TTN – це сервер, що прийнявши дані, розшифрує, обробляє їх та пересилає дані у вигляді HTTP-запиту. У цій структурній схемі кінцевою точкою є сервіс Blynk, тому запит надходить туди.

Vlynk cloud – є хмарною платформою, що обробляє дані та надає зручні інструменти візуалізації та керування через інтерфейс користувача.

Інтерфейс користувача, що можна підлаштувати під себе, відображає дані з датчиків, наприклад, у вигляді півколового індикатору на самому сайті або у мобільному застосунку Vlynk. Вибір вже залежить від користувача.

2.1.1 Розроблення алгоритму роботи системи

Частково алгоритм роботи був описаний у попередньому пункті, але розглянемо процес детальніше.

Насамперед на рис. 2.1 можна побачити, що система не є мобільною. Це було зроблено з ряду причин [41]:

- потреба у безперервному зборі даних, щоб мати можливість відразу зреагувати на будь-яку зміну параметрів;
- для зниження ризику втрати даних та пошкодження пристроїв;
- потреба у контролюванні ресурсів (добрив та води);
- зниження витрат на експлуатацію.

У таблиці 2.1 представлено порівняння стаціонарних та мобільних систем.

Таблиця 2.1 – Порівняння стаціонарної та мобільної систем

Критерій	Стаціонарна система	Мобільна система
Призначення	Моніторинг конкретних ділянок	Обстеження великих площ
Моніторинг	Безперервний	Періодичний
Якість даних	Висока і стабільна, досягається безперервним моніторингом. Живленням можуть виступати сонячні панелі чи стаціонарні мережі	Висока, але складніше забезпечити ідентичність точок вимірювання з часом.

Продовження таблиці 2.1

Критерій	Стаціонарна система	Мобільна система
		Складніше живлення: потужні акумулятори чи бездротова зарядка
Гнучкість використання	Легке використання, можна у будь-який час замінити елемент системи, не порушуючи загальну роботу	Потребує більших зусиль у використанні та людину, що буде контролювати маршрут техніки
Витрати на обслуговування	Нижчі після встановлення	Вищі через необхідність регулярного переміщення та налаштування; контролю заряду (у випадку системи, яка не кріпиться на трактор)
Вартість	Зазвичай доступна	Зазвичай висока
Інтеграція з іншими системами	Легка інтеграція з централізованими системами управління фермою	Може потребувати додаткових налаштувань для інтеграції
Шкода навколишньому середовищу	Мала	Може шкодити через використання палива та зсув ґрунту

Так як система встановлюється у полі, буде доречним визначити яким чином розташовувати датчикові вузли та коли саме потрібні дані про стан ґрунту. В залежності від масштабів поля, умов, типу ґрунту тощо, методом сітки розміщувати вузли буде раціональним вибором. Наприклад, візьмемо поле розміром в десять гектарів. Тоді, зважаючи на витрати для системи, умовно розділимо прямокутне поле на десять прямокутників по одному гектару, на кожному буде розміщено мікроконтролер з датчиками (рис. 2.2), де блакитні лінії

– розділення, кола – розміщення датчикових вузлів. Отримувати дані можна як і в режимі реального часу, так і встановити у системі обмеження, наприклад, робити вимірювання кожні 2-6 годин.



Рисунок 2.2 – Схематичне розділення сенсорних вузлів на полі в 10 га

У подальшому буде розглядатися лише один сенсорний вузол і принцип його роботи.

Отже, алгоритм системи автоматизації аналізу ґрунту буде наступним:

- після подачі живлення мікроконтролер запускається, виконує ініціалізацію периферійних інтерфейсів та готується до обміну даними з сенсорами;
- формування мікроконтролером запиту до сенсорів у форматі Modbus RTU та його надсилання через UART-порт на UART TTL перетворювач;
- транслювання перетворювачем запиту у RS-485-формат;
- вимірювання відповідних параметрів ґрунту; формування відповіді у вигляді пакету даних Modbus RTU і передавання назад по шині RS-485;
- UART TTL перетворювач приймає сигнал та передає його у вигляді UART (TTL-рівня) мікроконтролеру;

- мікроконтролер приймає дані, виконує їх обробку, перевірку контрольної суми, декодує значення параметрів та формує кінцевий пакет для передачі відповідно протоколу LoRaWAN;
- передача даних з мікроконтролера на шлюз;
- декодування шлюзом фізичного рівня LoRa;
- перетворювання LoRaWAN-пакетів на IP-пакети;
- передача IP-пакетів зі шлюзу через мобільну мережу 4G на TTN;
- обробка даних на сервері TTN (перевірка авторизації мікроконтролера в мережі, доступності надсилання даних; дешифрування даних, розроблення HTTP-запиту);
- TTN передає HTTP-запит на платформу Blynk та передає дані;
- Blynk приймає HTTP-запит і дані;
- Blynk зіставляє дані з потоками даних у вигляді віртуальних пінів та зберігає отримані значення;
- Blynk візуалізує значення датчиків у вигляді графіків, півколових індикаторів, числових значень тощо для інтерфейсу користувача, який можна налаштовувати;
- моніторинг показників ґрунту.

2.2 Вибір компонентів системи автоматизації аналізу ґрунту

Вибір компонентів системи є дуже важливим етапом, бо саме від них залежить точність, ефективність та надійність як її роботи, так і датчиків, і модулів зв'язку [42]. З рис. 2.1 видно якого напрямлення датчик задіяний у системи, але спочатку визначимося з моделлю мікроконтролера, який повинен забезпечувати збір даних, їх обробку та бездротову передачу.

2.2.1 Вибір мікроконтролера

У подібних системах поширені такі мікроконтролери: Arduino MKR WAN 1310, ESP32, STM32, Raspberry Pi Pico, ATmega328P тощо. Розглянемо підходящі під систему окремо.

Мікроконтролер Arduino MKR WAN 1310 – це покращена версія свого попередника MKR WAN 1300. Мікроконтролер відрізняється низьким енергоспоживанням завдяки процесору Microchip SAMD21, він має флеш-пам'ять SPI на два мегабайта і контроль енергоспоживання, що був вдосконалений для плати. Також оснащений Lora-модулем Murata (на базі Semtech SX1276), що дозволяє передавати дані на великі відстані за допомогою протоколу LoRaWAN [43]. Загалом, саме мікроконтролери сімейства Arduino відомі у робототехніці та не менш затребувані у IoT-системах, бо вони доступні і гнучкі. Arduino MKR WAN 1310 (рис. 2.3) підтримує такі середовища розробки як Arduino IDE, PlatformIO, VS Code.

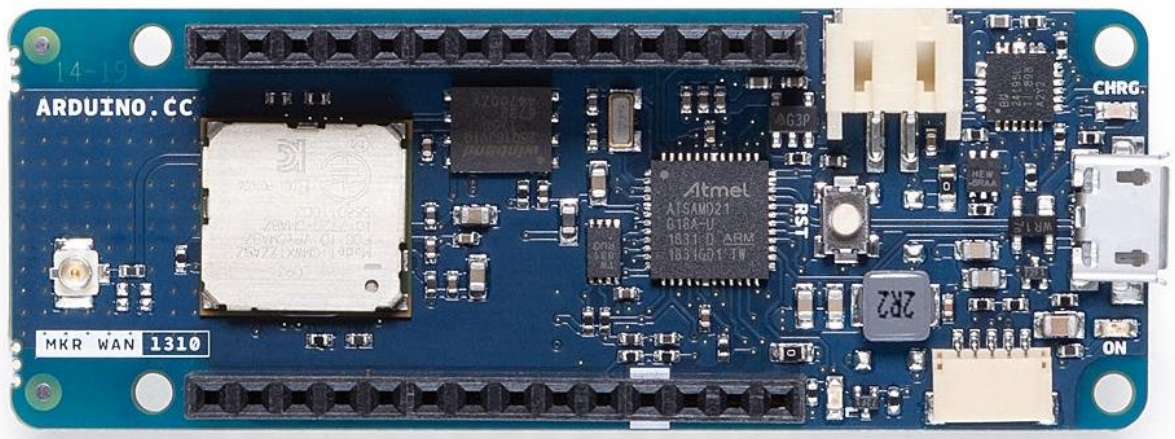


Рисунок 2.3 – Мікроконтролер Arduino MKR WAN 1310

ESP32 – це мікроконтролер, що має двоядерний процесор Tensilica Xtensa LX6, має до шістнадцяти мегабайт зовнішньої пам'яті і вбудований Wi-Fi з Bluetooth, але у деяких моделях, в залежності від потреб, вони можуть бути частково відсутні або замінені на інші види зв'язку. ESP32 підтримує кілька режимів для збереження енергії, тому зменшує споживання живлення в

автономних пристроях [44]. ESP32 мають ще більшу популярність, ніж моделі Arduino, так як вони мають високу продуктивність в додатку з обчислювальними можливостями, доступну ціну і багато периферійних інтерфейсів. Тому ці мікроконтролери застосовують у розумних будинках та моніторингових системах. ESP32 підтримує середовища розробок Arduino IDE, PlatformIO, ESP-IDF, Thonny, VS Code. Зовнішній вигляд HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa показано на рисунку 2.3.

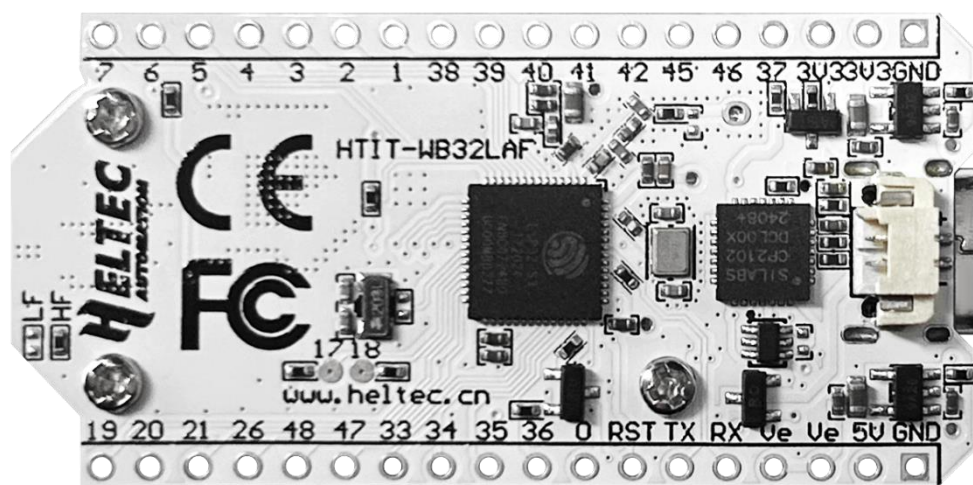


Рисунок 2.3 – Мікроконтролер HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa

Мікроконтролери STM32 також широко використовуються у вбудованих системах завдяки високим показникам продуктивності, широкому виборі моделей під різні завдання. Вони базуються на ядрах ARM Cortex і підтримують потужну екосистему зручного ПЗ, зокрема STM32CubeMX, а також середовищ розробки IAR Embedded Workbench, MDK-ARM, STM32CubeIDE, Arduino IDE. Завдяки гнучким можливостям периферії та підтримці бездротових технологій LoRa, BLE, Wi-Fi, ці контролери активно використовуються в проєктах автоматизації, IoT та промислових рішеннях [45]. Зовнішній вигляд показано на рисунку 2.4.

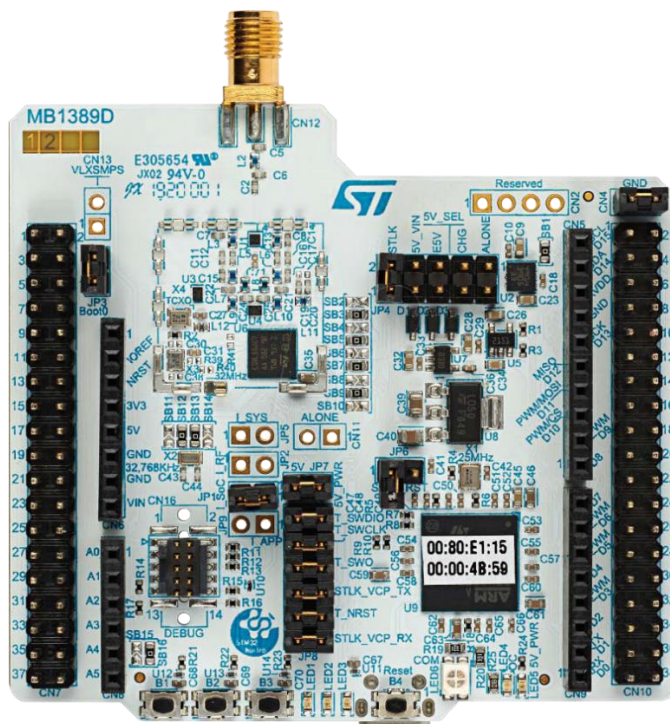


Рисунок 2.4 – Мікроконтролер STM32WL55JC

Порівняння характеристик мікроконтролерів для системи автоматизації аналізу ґрунту на базі IoT наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняння характеристик мікроконтролерів

Параметр	Модель		
	Arduino MKR WAN 1310	HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa	STM32WL55JC
Базовий MCU	SAMD21 Cortex- M0+ 32 біт, 48 МГц	ESP32-S3FN8 Xtensa LX7 32 біт, 240 МГц	STM32L5 Cortex- M4 32 біт, до 48МГц
Радіо модуль	Murata CMWX1ZZABZ (Semtech SX1276)	Sematech SX1262	Вбудований LoRa SX1262 (Semtech IP)
Живлення	3,3 В	3,3 В, 5 В через USB-C	1,8..3,6 В

Продовження таблиці 2.2

Параметр	Модель		
Пам'ять	256 КБ Flash, 32 КБ SRAM	8 МБ Flash, 512 КБ SRAM	256 КБ Flash, 64 КБ SRAM
Аналогові входи	7 каналів ADC 8/10/12 біт	До 20 каналів ADC 12 біт	До 16 каналів ADC 12 біт
Аналогові виходи	1 канал DAC 10 біт	2 канали DAC 8 біт	2 канали DAC 12 біт
Інтерфейси	8 цифрових I/O, UART, SPI, I2C	До 35 цифрових I/O UART, SPI, I2C, LoRa, Wi-Fi (2,4 ГГц 802.11 b/g/n), Bluetooth 5 LE	До 43 цифрових I/O UART, SPI, I2C, LoRa

У підсумку, кожен з мікроконтролерів має свої переваги та недоліки, але розглянувши вимоги для розроблюваної системи, було обрано HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa як найбільш збалансований мікроконтролер, що поєднує в собі доступність, простоту розробки, прийнятне енергоспоживання та інтегровану підтримку LoRaWAN. Технічні характеристики зробили його раціональним вибором для подальшого створення економічно-ефективної та надійної системи автоматизації аналізу ґрунту на базі технології IoT.

2.2.2 Вибір датчика

Від правильного вибору датчиків залежить точність отриманої інформації, яка потім використовується для рішень про внесення добрив чи зрошення. Використання окремих датчиків для кожного параметра ускладнює апаратну реалізацію, вимагає більше пінів, джерел живлення, а також збільшує ризик помилок під час передачі та калібрування даних. Саме тому доцільним є вибір комплексного датчика, що буде вимірювати усі потрібні параметри. Датчик NPKPHSTH-S зображено на рисунку 2.5, здатен одночасно вимірювати сім

параметрів ґрунту: температуру, вологість, Азот, Фосфор, Калій, рН та ЕС [46].
Технічні характеристики наведено у таблиці 2.3.



Рисунок 2.5 – Датчик для ґрунту NPKPHSTH-S

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики датчика NPKPHSTH-S

Живлення	5 В.. 30 В (DC)	
Споживна потужність	До 0,5 Вт при 24 В	
Інтерфейс передачі даних	RS485 (Modbus RTU), 4-20 мА, 0 В..5 В, 0 В..10 В	
Габарити	45 мм × 15 мм × 123 мм	
Вимірювальні параметри		
Температура	Діапазон	-40 °С.. +80 °С
	Точність	±5 °С при 25 °С
	Час відгуку	≤ 15 с
Вологість	Діапазон	0-100 % RH
	Точність	±2% (0-50 %), ±3 % (50-100 %)
	Час відгуку	≤ 4 с

Продовження таблиці 2.3

Вимірювальні параметри		
ЕС	Діапазон	0-20000 $\mu\text{S}/\text{см}$
	Точність	$\pm 3 \%$ (0-10000 $\mu\text{S}/\text{см}$), $\pm 5 \%$ (10000-20000 $\mu\text{S}/\text{см}$)
	Час відгуку	$\leq 1 \text{ с}$
рН	Діапазон	3-9 рН
	Точність	$\pm 0,3 \text{ рН}$
	Час відгуку	$\leq 10 \text{ с}$
N, P, K	Діапазон	1-1999 мг/кг
	Точність	$\pm 2 \%$ від повної шкали
	Час відгуку	$< 1 \text{ с}$

Датчик NPKPHSTH-S використовує інтерфейс RS485 (Modbus RTU), який призначений для надійної передачі даних на великі відстані в промислових умовах і, нажаль, не сумісний напряму з логікою мікроконтролерів типу ESP32, які працюють з UART TTL рівнями (3,3 В або 5 В). Для забезпечення обміну даних між датчиком і мікроконтролером, необхідний перетворювач RS485 – UART TTL (рис. 2.6), що узгоджує електричні рівні сигналів і протоколів, дозволяючи ESP32 коректно отримувати та передавати Modbus-пакети [47]. Технічні характеристики наведено у таблиці 2.4.

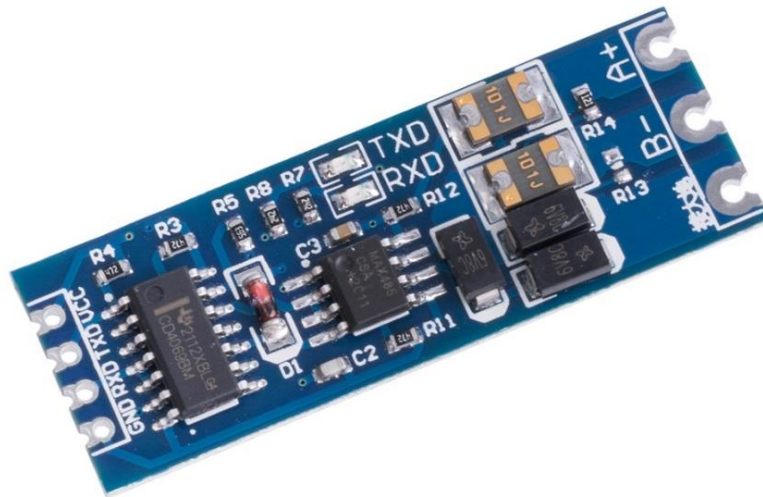


Рисунок 2.6 – RS485 – UART TTL перетворювач

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики перетворювача RS485 – UART TTL

Модель	HW-0519
Інтерфейс TTL	Роз'єм: 4-контактний ряд (GND, RXD, TXD, VCC); рівні сигналів: сумісні з 3,3 В та 5 В логікою
Інтерфейс RS485	Роз'єми: 2 контакти для пайки проводів (A+, B-); отвори для встановлення клемника; тип сигналу: диференціальний, збалансований
Режим роботи	Напівдуплексний
Максимальна дальність зв'язку	До 800 м (з використанням витої пари)
Напруга живлення	3,3 В.. 5 В
Споживаний струм	< 5 мА в режимі прийому, < 10 мА в режимі передачі
Захист	TVS-діоди для захисту від перенапруг та статичної електрики
Робоча температура	-40 °С.. +85 °С

2.2.3 Вибір живлення

Для того, щоб забезпечити автономну роботу системи, необхідно забезпечити надійне джерело живлення. Усі компоненти, які були обрані у попередніх пунктах, потребують стабільного живлення напругою 3,3 В.. 5 В. Враховуючи польові умови сільських господарств, де на великих угіддях часто немає постійного підключення до електромережі, доцільно буде використовувати акумулятор та сонячну панель. Акумулятор буде накопичувати енергію та живити систему в нічний час або за несприятливих погодних умов, а за допомогою сонячної панелі система буде жититися протягом дня.

Для енергоспоживання компонентів, а це приблизно до 200 мА в пікових режимах передачі по LoRaWAN, раціонально використовувати літій-полімерну батарею ємністю 3000 мА/год з напругою 3,7 В (рис. 2.7). Це дозволить забезпечувати достатній режим автономності при частій передачі даних [48]. Технічні характеристики наведено у таблиці 2.5.



Рисунок 2.7 – Акумулятор літєво-полімерний Li-Po 3000 мА/год 3,7 В

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики літєво-полімерного акумулятора

Ємність	3000 мА/год
Номінальна напруга	3,7 В
Максимальний струм розряду	2 А
Вбудований захист	Від перерозряду і перезаряду

Акумулятор також потребує підзарядки, тому буде доцільно встановити сонячну панель (рис. 2.8), яка буде компенсувати щоденне енергоспоживання, наприклад, потужністю 6 Вт з вихідною напругою 6 В, що відповідає вимогам до роботи з більшістю літій-іонних зарядних контролерів [49]. Технічні характеристики наведено у таблиці 2.6.



Рисунок 2.8 – Фотоелектрична сонячна панель

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики фотоелектричної сонячної панелі

Матеріал	Полікристалічний епоксидний сонячний елемент
Потужність	6 Вт
Робоча напруга	Максимально 6 В
Робочий струм	Максимально 960 мА
Розміри	165 мм × 210 мм × 3 мм

Попри те, що акумулятор, обраний для системи має вбудовані захисти від основних критичних режимів, він не виконує функції повноцінного керування

зарядом. Особливо у випадку використання нестабільного джерела енергії сонячної панелі можливі ситуації перевищення безпечних меж струму або напруги, що поступово знижує термін служби акумулятора або призводить до його деградації. Саме для цього є зарядний контролер (рис. 2.9), який контролює вхідну напругу і струм, а також запобігає його перезаряду, перерозряду чи перегріву [50]. Технічні характеристики наведено у таблиці 2.7.

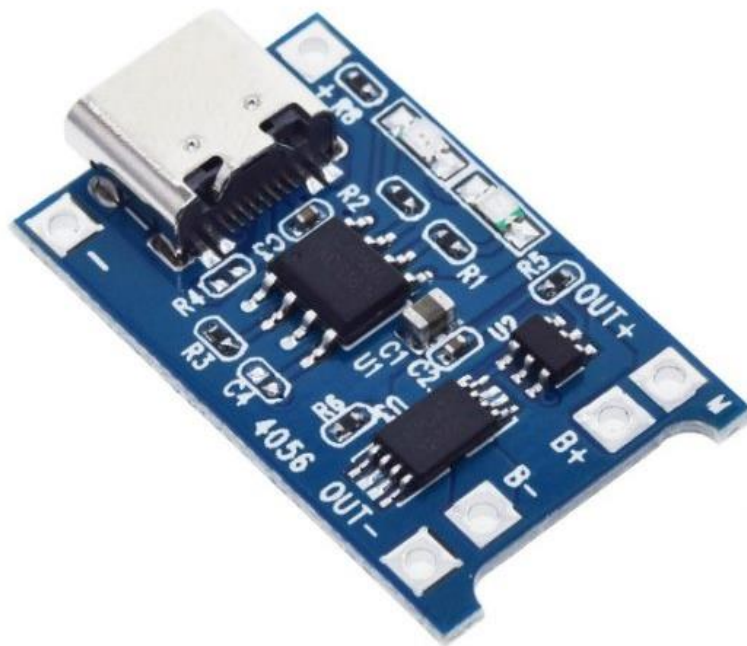


Рисунок 2.9 – Контролер заряду Li-Ion акумуляторів на базі TP4056 Type-C

Таблиця 2.7 – Технічні характеристики контролеру заряду Li-Ion

Вхідна напруга	4 В..8 В
Напруга повного заряду	4,2 В
Максимальний струм заряду	1000 мА
Мінімальний струм заряду	50 мА
Максимальний струм розряду	3,5 А
Діапазон робочих температур	-10 °С.. +125 °С

2.3 Розроблення апаратної частини системи автоматизації

Спочатку була розроблена схема підключення усіх компонентів системи у середовищі Fritzing. У бібліотеці компоненти не було обраного попередньо мікроконтролера HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa, тому замість нього використано Heltec Wi-Fi LoRa 32 V2. Сенсор NPKPHSTH-S симулюється як перетворювач логіки, що дозволяє мікроконтролеру зчитувати дані з датчика через стандартний послідовний інтерфейс. Модуль TP4056 служить для заряджання літій-полімерного акумулятора, а також виступає в ролі захисту від перенапруги. Живлення мікроконтролера та інших компонентів здійснюється саме через TP4056. Підвищуючий перетворювач TPS61200 забезпечує стабілізовану напругу живлення, що необхідна для роботи деяких компонентів, зокрема сенсора та MAX485, при живленні акумулятора. Сонячна панель використовується як джерело альтернативного живлення. Вона підключена до входу TP4056, дозволяє заряджати акумулятор за умов наявності сонячного світла, тим самим забезпечуючи енергонезалежність системи. На рисунку 2.10 представлено підключення усіх компонентів системи автоматизації аналізу ґрунту.

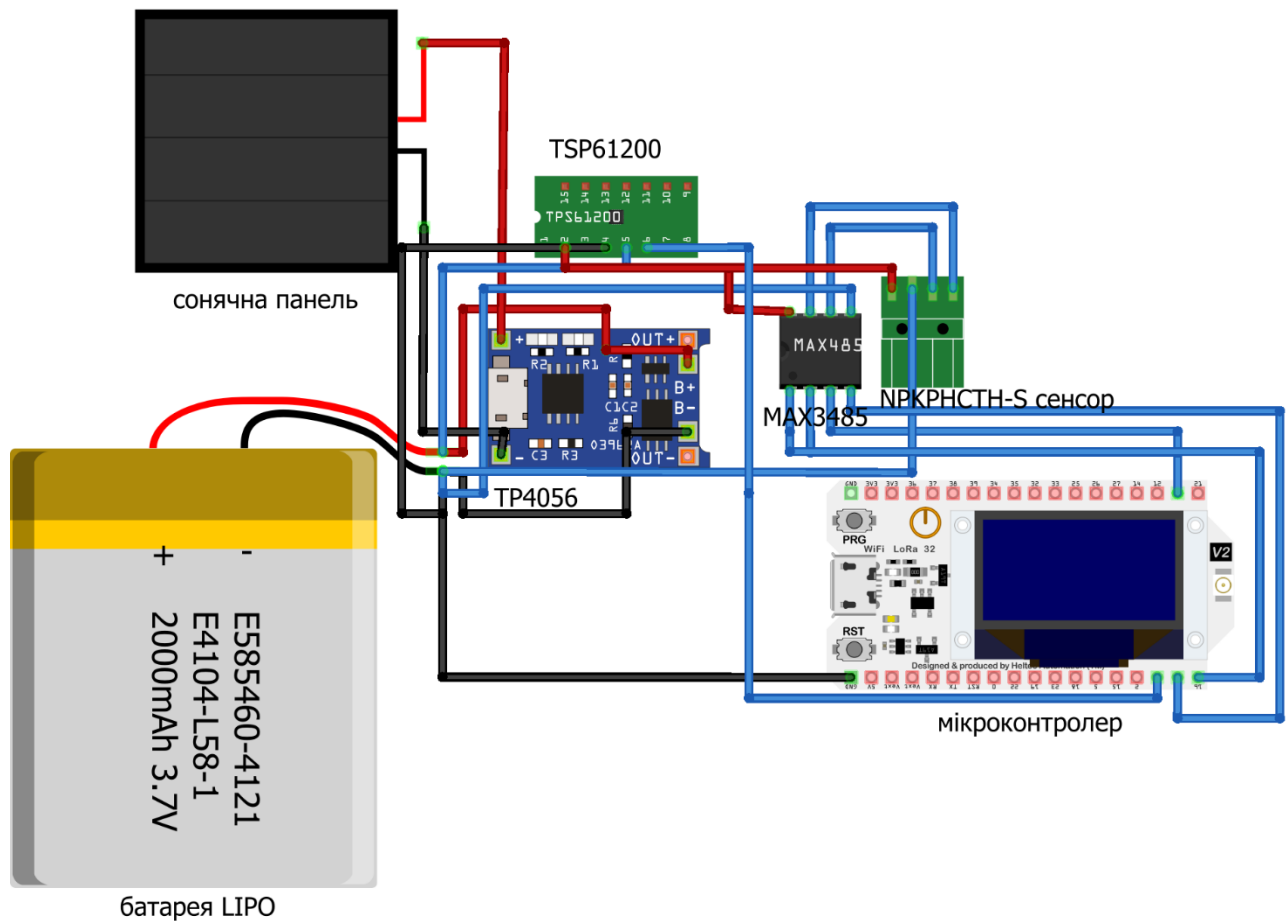


Рисунок 2.10 – Схема підключення датчика та інших компонентів до мікроконтролера

Наступним кроком буде створення проєкту у Wokwi. Через обмеження у компонентах, було прийнято рішення залишити тільки два: мікроконтролер та датчик, щоб показати принцип передачі даних за допомогою IoT з датчика у Wokwi до сервісу Blynk. Датчик NPKPHCTH-S було симульовано як кастомний чіп, а за мікроконтролер було обрано ESP32-S3, що є основою модуля HELTEC Automation ESP32-S3 LoRa (рис. 2.11).

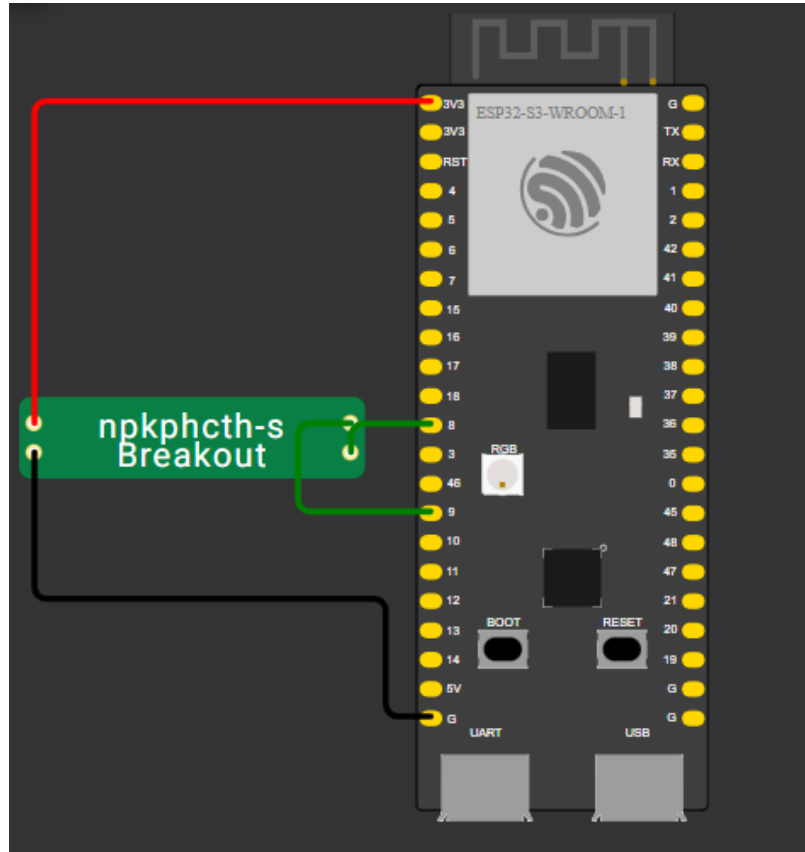


Рисунок 2.11 – Підключення кастомного чіпу до мікроконтролера

Після реєстрації у сервісі Blynk, було створено проєкт та додано пристрій (рис. 2.12).

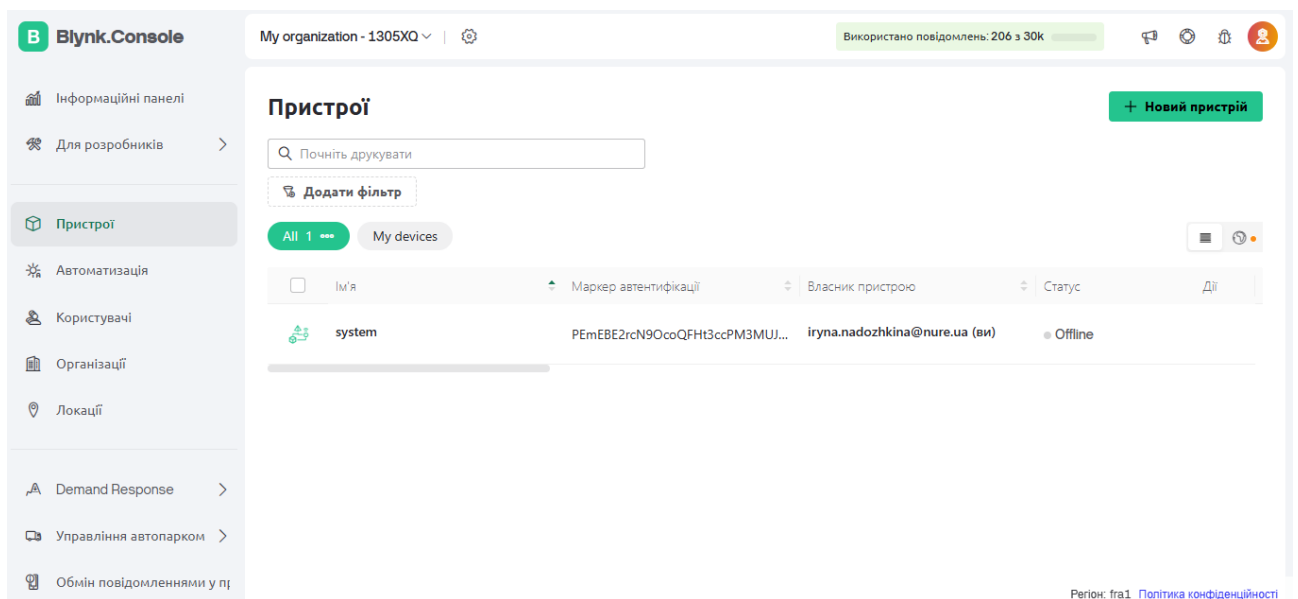


Рисунок 2.12 – Сторінка «Пристрої» у Blynk

У налаштуваннях проєкту було обрано мікроконтролер типу ESP32 та тип підключення. Нажаль, для використання LoRaWAN у Blynk потрібно оформити платну підписку на сервіс The Things Stack, тому рішенням стало обрання Wi-Fi. Наступним кроком стало створення потоків даних, які будуть передаватися. Для кожного значення було додано: віртуальний пін, що потім використовується у коді Wokwi; тип даних; мінімальне та максимальне значення (рис. 2.13).

<input type="checkbox"/>	ID	Ім'я	Пін	Колір	Тип даних	Одиниці	"Сирі" ...	Мінімум	Дії
<input type="checkbox"/>	1	N	V0		Ціле число		false	5	
<input type="checkbox"/>	2	P	V1		Ціле число		false	3	
<input type="checkbox"/>	3	K	V2		Ціле число		false	20	
<input type="checkbox"/>	4	pH	V3		Дробове число		false	3	
<input type="checkbox"/>	5	Temp	V4		Дробове число	°C	false	-5	
<input type="checkbox"/>	6	Humi	V5		Дробове число	%	false	1	
<input type="checkbox"/>	7	EC	V6		Ціле число		false	50	

Рисунок 2.13 – Створені потоки даних

Blynk, як вже було згадано у попередньому пункті, дозволяє створювати власні дашборди. На рисунку 2.14 представлено усі додані на нього півколові індикатори.

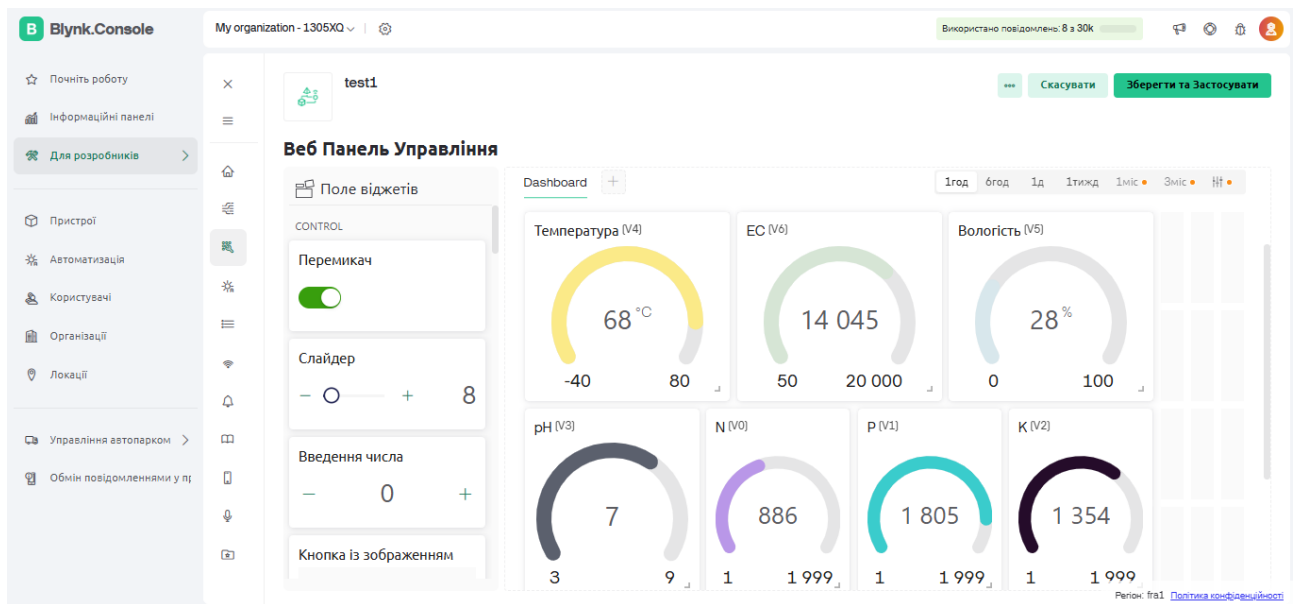


Рисунок 2.14 – Видгляд панелі дашборду

Щоб зв'язати проєкт із Blynk, на початку у головному файлі sketch.ino у Wokwi було додано такі строки, що містять ідентифікатор шаблону, його назву та токен з Blynk, без яких підключення неможливо:

```
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL4oOFG8RvY"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "system"
#define                                     BLYNK_AUTH_TOKEN
"PEmEBE2rcN9OcoQFHt3ccPM3MUJ0bQio"
```

Потім було підключено усі необхідні бібліотеки та налаштовано підключення до Wi-Fi, було використано спеціальну мережу Wokwi, що не має пароля:

```
char ssid[] = "Wokwi-GUEST";
char pass[] = "";
```

У випадку LoRaWAN же, окрім інших бібліотек для підключення, потрібні ідентифікатори та ключі LoRaWAN, наприклад, при активації через Over the Air

Activation (ОТАА), потрібні такі ідентифікатори: APPEUI, DEVEUI та ключ APPKEY.

Через серійний порт, так як датчик – лише симуляція, користувач має змогу ввести кожен параметр ґрунту, що потім зберігається у структурі SensorData за допомогою функції зчитування чисел типу float. Введені значення рН, температури та вологості масштабуються для зберігання у форматі цілого числа, а після цього конвертуються назад та виводяться в консоль. Функція Blynk.virtualWrite надсилає значення на відповідні віртуальні піни. Таймер активується після підключення Wi-Fi і періодично надсилає на з'єднаний проєкт Blynk дані.

На рисунках 2.15-2.16 показано результат роботи передачі даних.

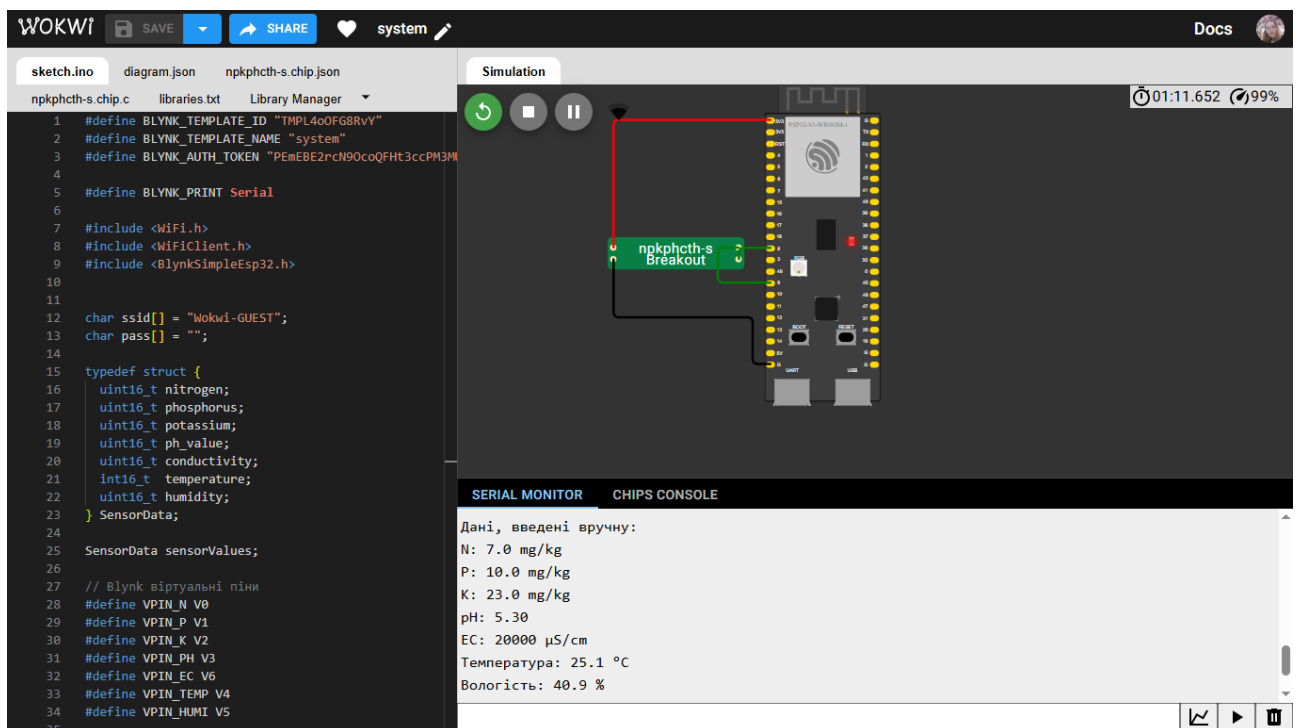


Рисунок 2.15 – Введені значення у Wokwi

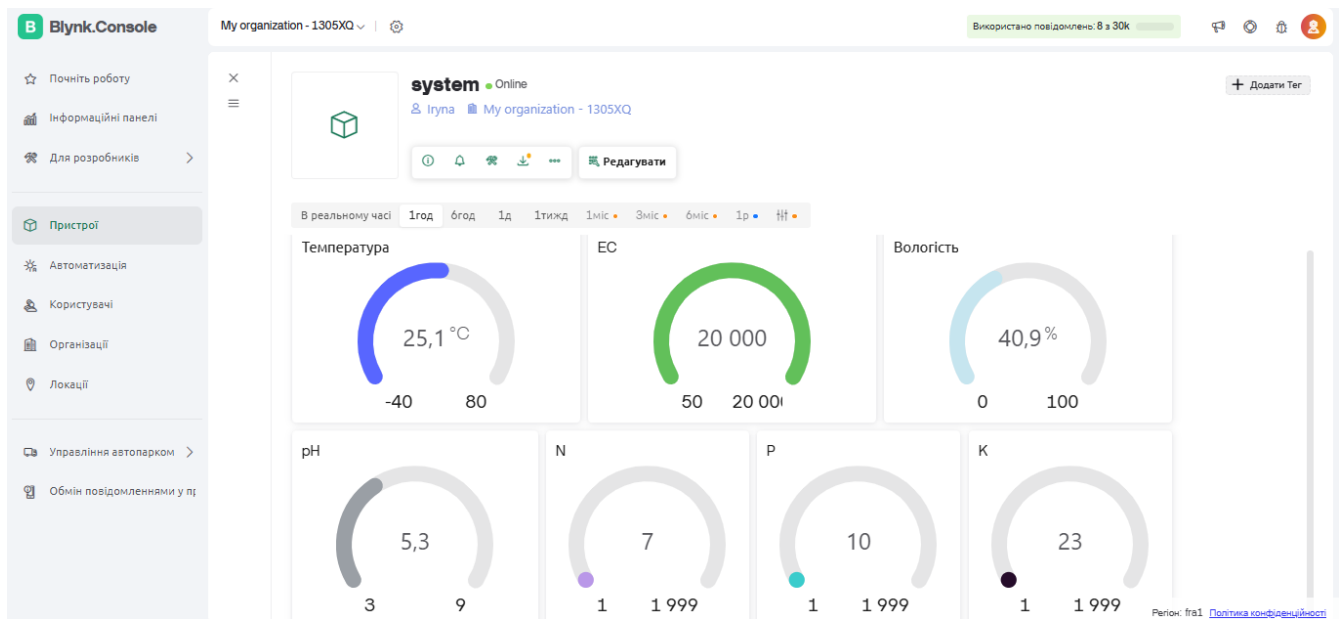


Рисунок 2.16 – Передані значення з Wokwi до дашборду Blynk

Повний код наведено у додатку Б.

2.4 Комп'ютерне моделювання передавальної функції живлення системи

2.4.1 Розрахунок часу роботи системи від акумулятора та сонячної батареї

Припустимо, що вимірювання параметрів датчиком буде проводитися раз на годину. Знаючи вимоги до споживаної потужності компонентів системи, розрахуємо час роботи системи від акумулятора та від сонячної батареї за умови розрядженого акумулятора та чистого неба.

Спочатку розрахуємо середній струм споживання системи (2.1). Загальна тривалість активності $t_{\text{актив}} = 16$ с, за які датчик виміряє сім параметрів ґрунту, а мікроконтролер передасть їх через LoRaWAN. $I_{\text{актив}} = 132,8$ мА, що є середнім струмом під час вимірювання та передачі даних.

$$I_{\text{сер}} = \frac{(I_{\text{актив}} \cdot t_{\text{актив}}) + (I_{\text{сон}} \cdot t_{\text{сон}})}{T_{\text{циклу}}}, \quad (2.1)$$

$$I_{\text{сер}} = \frac{(132,8 \cdot 16) + (0,515 \cdot 3584)}{3600 \text{ с}} = \frac{3970,6}{3600} \approx 1,103 \text{ мА.}$$

Тоді час автономної роботи від акумулятора:

$$T_{\text{акум}} = \frac{C_{\text{акум}}}{I_{\text{сер}}}, \quad (2.2)$$

де $C_{\text{акум}}$ – ємність акумулятора (мА/год);

$$T_{\text{акум}} = \frac{3000}{1,103} \approx 2719,85 \text{ годин} \approx 113,33 \text{ днів.}$$

Середня потужність споживання системи:

$$P_{\text{сер}} = I_{\text{сер}} \cdot U_{\text{номінальна}}, \quad (2.3)$$

де $U_{\text{номінальна}}$ – номінальна напруга акумулятора (В);

$$P_{\text{сер}} = 1,103 \cdot 3,7 = 4,0811 \text{ мВт.}$$

Тоді енергія споживання за добу ($E_{\text{доб}}$):

$$E_{\text{доб}} = 4,0811 \cdot 24 \approx 97,946 \text{ мВт} \cdot \text{год} \approx 0,0979 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

За умови чистого неба, припустимо, що в середньому буде вісім годин ефективного сонячного світла на добу для пікової генерації.

$$E_{\text{доб}} = P_{\text{сонячна}} \cdot 8 \text{ год}, \quad (2.4)$$

$$E_{\text{доб}} = 6 \cdot 8 = 48 \text{ Вт} \cdot \text{год.}$$

Отже, добова генерація енергії перевищує добове споживання, тому сонячна батарея зможе жити систему під час світлового дня та ще генерувати надлишок, який буде йти на зарядку акумулятора.

2.4.2 Оцінка стійкості системи

Так як система автоматизації лише збирає дані, обробляє їх та не впливає на зовнішні фактори, які впливають на стан ґрунту, тоді система є розімкнутою. Передавальна функція розімкнутої системи:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1}, \quad (2.5)$$

де T – постійна часу (с);

K – коефіцієнт підсилення;

Розрахуємо передавальну функцію живлення системи:

$$W(s) = \frac{1}{21600s+1}.$$

Запишемо характеристичне рівняння:

$$21600s + 1 = 0. \quad (2.6)$$

Вирішивши рівняння, отримуємо $s \approx -4,6$, тобто, корінь є дійсним від'ємним числом і розташований на від'ємній дійсній осі. Згідно з критерієм стійкості за коренями, лінійна стаціонарна система є стабільною, якщо всі корені її характеристичного рівняння розташовані на лівій півплощині комплексної площини [51]. Тому можна зробити висновок, що розімкнута система є стійкою.

Для характеристичного рівняння (2.6) побудуємо перехідну характеристику (рис. 2.17). На графіку можна побачити, що реакція системи живлення поступово досягає усталеного рівня без різких коливань, відсутність

перерегулювання вказує на те, що робота джерела живлення стабільна і здатна адаптуватися до змін навантаження без перевищення допустимих значень.

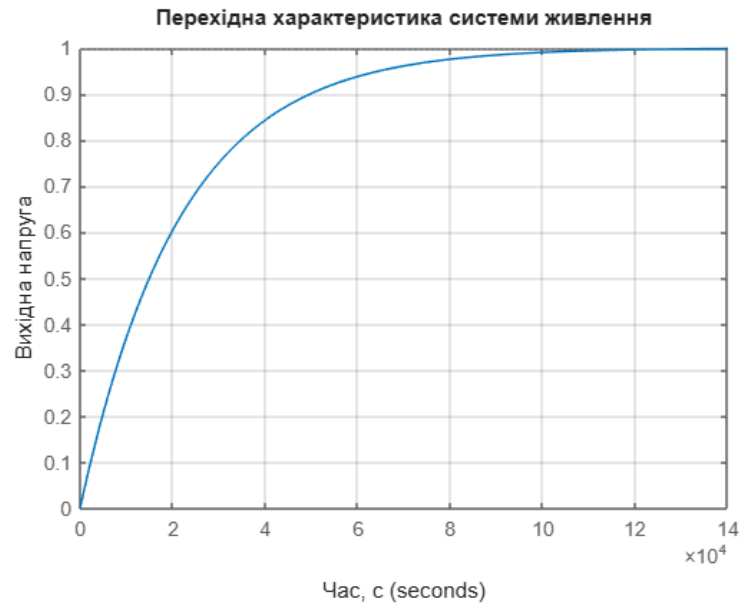


Рисунок 2.17 – Перехідна характеристика розімкненої системи

Побудуємо годограф Найквіста (рис. 2.18). Він має еліптичну форму та розташований повністю у правій півплощині. Критична точка $(-1, 0)$ не охоплюється годографом, тому нестійкі полюси відсутні. З цього можна зробити остаточний висновок, що система є стійкою.

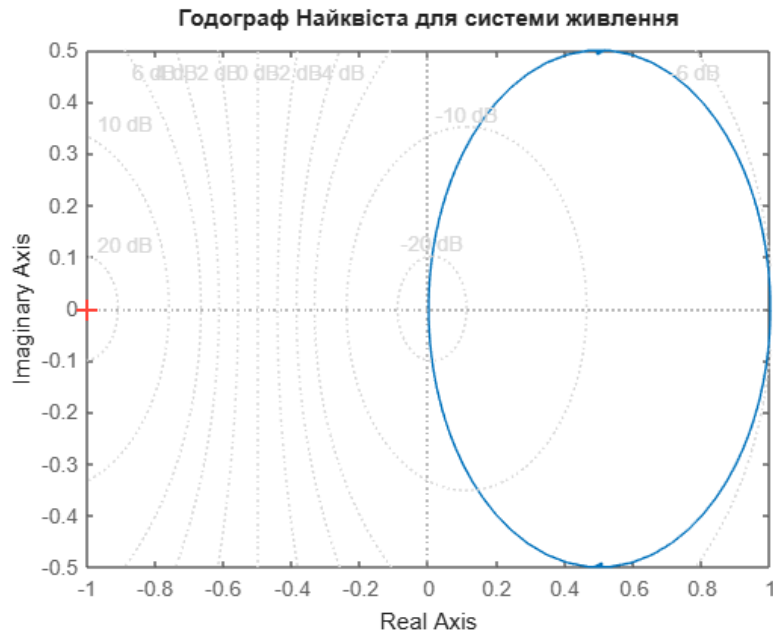


Рисунок 2.18 – Годограф Найквіста

Побудуємо амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) (рис. 2.19). АЧХ дозволяє зрозуміти як система реагує на сигнали з різною частотою. На побудованому графіку видно, що на низьких частотах система має велику амплітуду, тобто, добре передає повільні зміни сигналу. При збільшенні частоти амплітуда зменшується.

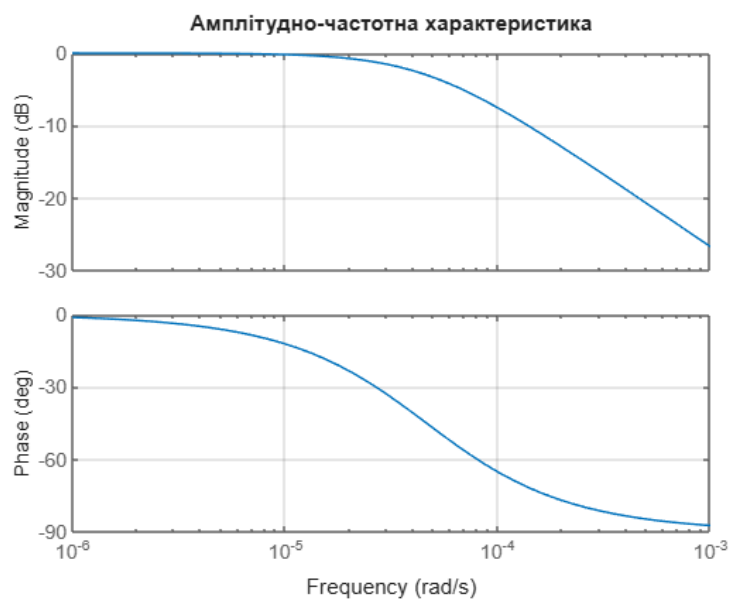


Рисунок 2.19 – АЧХ живлення системи

3 РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ АНАЛІЗУ ҐРУНТУ У ВИГЛЯДІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Вибір середовища програмування

Розроблення системи автоматизації аналізу ґрунту вимагає використання різноманітних програмних інструментів та середовищ, так як окрім забезпечення передачі даних мікроконтролером, є потреба у зрозумілому інтерфейсі для відображення отриманих даних. Раціональний вибір цих інструментів є важливим для ефективності процесу розроблення, налагодження, тестування та подальшої підтримки системи. Для досягнення мети були обрані такі інструменти та середовища програмування: Fritzing, Wokwi, Blynk, VS Code, Streamlit.

Для створення візуальних схем з'єднань електронних компонентів буде використано середовище Fritzing. Окрім наочності підключення, Fritzing дозволяє створювати макети для подальшого виготовлення друкованих плат.

Для тестування, налагодження, демонстрації роботи візуально за відсутністю фізичного обладнання мікроконтролера та інших компонентів системи, існують онлайн-симулятори. Wokwi якраз є одним з них, хмарною платформою для моделювання і кодування проєктів з різними мікроконтролерами, включаючи ESP32, Arduino, STM32, Pi Pico. Це веб-орієнтований симулятор, що є однією із головних переваг Wokwi, тобто, доступність одразу працювати у браузері без додаткових ПЗ.

Wokwi підтримує мову програмування C/C++, має вбудований зручний редактор коду, тому якщо допустити помилку, її буде легко знайти та виправити з підсвіткою синтаксису ще до завантаження коду на фізичний мікроконтролер. Усі проєкти зберігаються у хмарі на акаунті користувача, завдяки чому можна швидко вносити зміни і спостерігати за симуляцією системи [52]. Нажаль, симуляція радіопередачі LoRaWAN у Wokwi обмежена у деталізації протоколу,

але базову взаємодію мікроконтролера з модулем LoRa на рівні UART можна частково імітувати для перевірки ініціалізації та обміну даними.

Для візуалізації даних, отриманих від датчика через мережу LoRaWAN, було обрано IoT-платформу Blynk. Blynk допомагає створити мобільні та веб-інтерфейси для моніторингу та керування пристроями, надаючи вже готові рішення для розгортання дашбордів (панелей моніторингу). Платформа складається з хмарного сервера, мобільних застосунків (IOS/Android) та веб-панелі, а також бібліотек для мікроконтролерів. Blynk підтримує LoRaWAN через інтеграцію з зовнішніми мережами, наприклад, TTN, а також передачу даних через Wi-Fi, Ethernet, GSM, Satellite.

Blynk підтримує налаштування візуальних компонентів, включаючи графіки, індикатори, шкали, таблиці, карти тощо без необхідності вручну писати код. Платформа автоматично обробляє надходження даних та оновлює відображення у реальному часі та надає можливість перегляду історичних даних за певний період [53]. Однак, Blynk має обмеження в обміні повідомлень у місяць, також деякі функції доступні лише за платною підпискою на сервіс. Але ще одним плюсом є тісна співпраця з Wokwi, з-за чого свій проєкт можна швидко підключити до Blynk.

Незважаючи на використання Blynk для базової візуалізації процесу передачі даних, для більш глибокого аналізу даних та реалізації специфічних функцій, що не передбачені функціоналом IoT-платформи, було обрано розроблення додаткового програмного засобу. Як основне середовище розроблення використовуватиметься VS Code з використанням мови програмування Python. VS Code – це безкоштовне та багатоплатформове середовище розробки з широкою підтримкою мов програмування і бібліотек, безлічі розширень та воно має загалом зручний інтерфейс [54].

Python є однією з найвідоміших та найпопулярніших мов програмування завдяки неважкому синтаксису та багатому вибору бібліотек для різних завдань у роботі з даними – pandas, numpy, matplotlib, plotly) [55]. Її широко використовують як у робототехніці, так і у сфері IoT. Python є гарним вибором

обробки даних у вигляді таблиць чи іншого формату, їх зберігання, виконання необхідних розрахунків.

Основною бібліотекою для інтерактивного веб-інтерфейсу з виводом показників та представленню результаті аналізу даних, зібраних датчиком, було обрано Streamlit. Завдяки ній спростовується процес створення дашбордів, елементів керування, інтеграції таблиць чи графіків, а також карт, їх використання [56]. В рамках VS Code зручно писати та налагоджувати код на Python зі Streamlit, використовуючи відповідні розширення та інтегрований термінал для запуску застосунків Streamlit.

3.2 Розроблення програмного засобу

Після створення проєкту у VS Code, створюємо файл `app.py`, де буде знаходитися основна частина коду. У Google Cloud Console після створення акаунту та проєкту завантажуюмо звідти JSON файл з ключем сервісного акаунту та додаємо до проєкту у VS Code. Це потрібно для роботи з Google Sheets. Далі у `app.py` підключаємо відповідні бібліотеки (рис. 3.1).

```
1 import streamlit as st
2 import requests
3 import pandas as pd
4 from data_loader import load_from_json, load_from_google_sheets
5 from analysis_logic import analyze_soil_conditions, recommend_suitable_crops, get_fertilizer_and_care_advice
6 from streamlit_echarts import st_echarts
7 import base64
8 import streamlit.components.v1 as components
```

Рисунок 3.1 – Підключені бібліотеки

Деякі бібліотеки були встановлені через термінал. Найголовніші для проєкту такі:

- `venv` для створення ізольованих середовищ Python і для того, щоб уникнути конфліктів версій бібліотек;
- `streamlit` для швидкої розробки інтерактивних веб-застосунків;
- `pandas` для роботи з табличними даними;

- `gsread` та `ouauth2client` для взаємодії з Google Sheets API та автентифікації;
- `folium` та `streamlit-folium` для створення інтерактивних карт, які можна вбудовувати у Streamlit;
- `plotly` для побудови складних інтерактивних візуалізацій графіків та даних;
- `streamlit-echarts` для створення кастомних інтерактивних графіків у Streamlit;
- `scikit-learn` для машинного навчання;
- `joblib` для збереження та завантаження навчених моделей;
- `numpy` для роботи з багатовимірними масивами та математичними операціями;
- `requests` для роботи з API погоди;
- `base64` та `streamlit.components.v1 as components` для роботи з зображеннями та вбудовування HTML/CSS.

Далі для налаштування параметрів сторінки використовуємо функцію `set_page_config`, без неї вона б мала вузький макет, що є стандартним для бібліотеки Streamlit. Для сторінки можна завантажити зображення. Це допомагає зробити функція `img_to_base64` (рис. 3.2).

```
10 st.set_page_config(  
11     page_title="Аналіз ґрунту",  
12     layout="wide",  
13     initial_sidebar_state="expanded"  
14 )  
15  
16 def img_to_base64(image_path):  
17     try:  
18         with open(image_path, "rb") as img_file:  
19             return base64.b64encode(img_file.read()).decode('utf-8')  
20     except Exception as e:  
21         st.error(f"Помилка завантаження зображення '{image_path}': {str(e)}")  
22     return ""
```

Рисунок 3.2 – Функції `set_page_config` та `img_to_base64`

Для додавання погодного віджету зверху сторінки застосовується функція `def get_weather` (рис. 3.3). Функція отримує актуальні дані погоди через сервіс OpenWeatherMap, використовуючи координати датчика.

```

24 def get_weather(lat, lon):
25     try:
26         API_KEY = "6be5db735b430e26e46729bd12d392f7"
27         url = f"http://api.openweathermap.org/data/2.5/weather?lat={lat}&lon={lon}&appid={API_KEY}&units=metric&lang=uk"
28         response = requests.get(url, timeout=5)
29         response.raise_for_status()
30         data = response.json()

```

Рисунок 3.3 – Застосування функції `def get_weather`

Далі був доданий блок `css_styles`, щоб оформити заголовок сторінки та додати віджет поверх фону, а також зробити інтерфейс дещо краще, ніж стандартні стилі Streamlit. На рисунку 3.4 можна побачити фінальний результат налаштування.

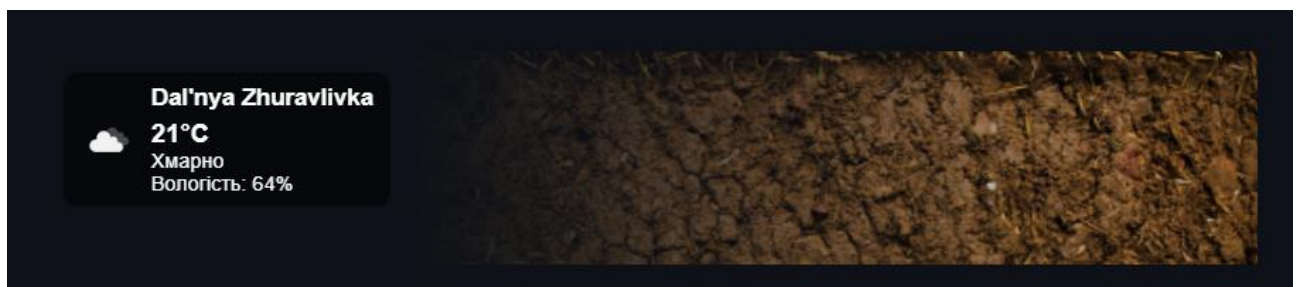


Рисунок 3.4 – Вигляд верхньої панелі сторінки

На бічній панелі є елементи керування для завантаження даних. Користувач може обрати завантаження даних з JSON файлу, Google Sheets або ввести дані власноруч. Після завантаження або введення даних, якщо їх більше одного запису, з'являється `st.sidebar.selectbox`, який дозволяє користувачеві вибрати конкретний запис для аналізу.

Для завантаження даних у вигляді з JSON файлу, посилання на Google Sheets таблицю або ручного вводу додаємо блок коду, зображений на рисунку 3.5. За таким же принципом додаємо інші вибори завантаження та введення даних.

```

357 if data_source_type == 'JSON файл':
358     uploaded_file = st.sidebar.file_uploader("Завантажте ваш JSON файл", type=["json"])
359     if uploaded_file:
360         with st.spinner("Завантаження даних..."):
361             st.session_state.soil_data = load_from_json(uploaded_file)
362             st.session_state.selected_record_index = 0
363             st.session_state.selected_crop_for_advice = None
364             st.session_state.data_loaded_message_shown = False
365             if st.session_state.soil_data.empty():
366                 st.sidebar.error("Помилка завантаження даних з JSON abc файл порожній.")
367             else:
368                 st.sidebar.success("Дані з JSON завантажено!")
369                 st.rerun()

```

Рисунок 3.5 – Додані блоки коду для завантаження та вводу даних

У результаті бічна панель має вигляд, зображений на рисунку 3.6.

Налаштування та дії

Джерело даних

Оберіть тип джерела:

- JSON файл
- Google Sheets
- Ввести дані вручну

Завантажте ваш JSON файл

Drag and drop file here
Limit 200MB per file • JSON

Налаштування та дії

Джерело даних

Оберіть тип джерела:

- JSON файл
- Google Sheets
- Ввести дані вручну

Введіть ID або URL Google Sheets:

Рисунок 3.6 – Вигляд бічної панелі «Налаштування та дії»

Щоб користувачу було зручно, було додано два режими роботи: моніторингу та порад. Залежно від вибору, з'являються відповідні елементи керування. Переключатися між ними можна завдяки перемикачу (рис. 3.7-3.8).

```

337 switch_mode = st.toggle(
338     "Режим порад",
339     value=(st.session_state.current_mode == "advice"),
340     help="Увімкнено: Режим порад щодо вибору культур. Вимкнено: Режим моніторингу стану ґрунту.",
341     key="mode_selection_toggle_labeled"
342 )
343
344 if switch_mode:
345     st.session_state.current_mode = "advice"
346 else:
347     st.session_state.current_mode = "monitoring"

```

Рисунок 3.7 – Додавання перемикача

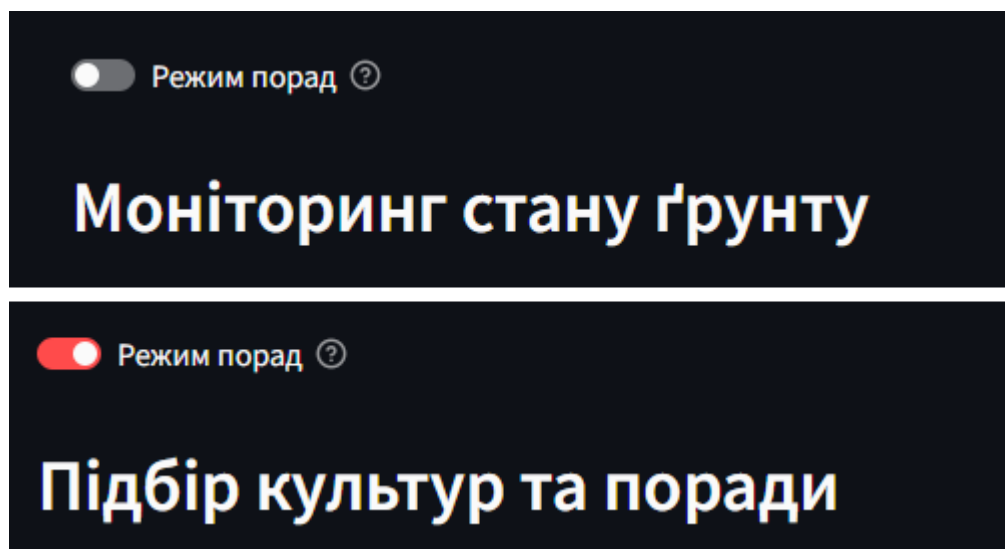


Рисунок 3.7 – Вигляд перемикача режимів на сторінці

При натисканні на назву культури викликається `get_fertilizer_and_care_advice` для генерації детальних порад щодо добрив та догляду. На рисунках 3.8-3.9 наведено приклад рекомендацій.

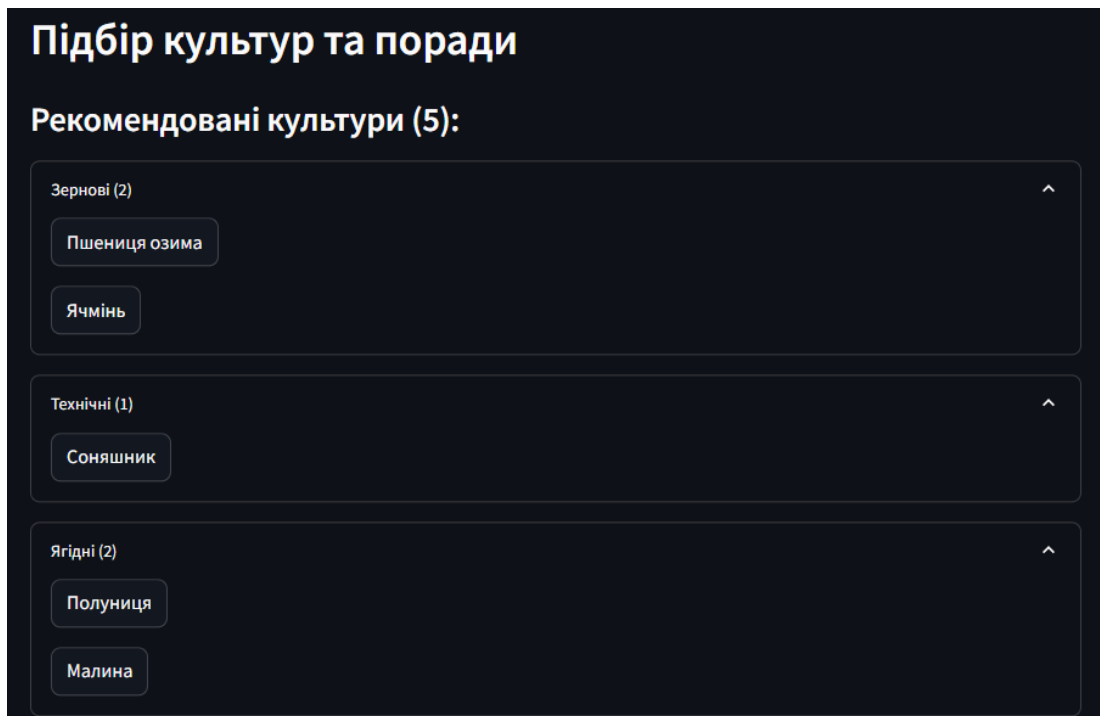


Рисунок 3.8 – Рекомендовані культури в залежності від параметрів ґрунту

Налаштування та дії

Джерело даних

Оберіть тип джерела:

JSON файл

Google Sheets

Ввести дані вручну

Введіть ID або URL Google Sheets:

Знайдено 3 запис(ів).

Оберіть запис для аналізу:

Поради для: Малина

Аналіз ґрунту та рекомендації

Параметр	Стан	Рекомендовані дії
Азот (N)	Рівень оптимальний	Поточний показник: 152.0 ppm. Оптимальний для 'Малина': 90.0-140.0 ppm. Додаткове внесення зазвичай не потрібне.
Фосфор (P)	Рівень оптимальний	Поточний показник: 50.0 ppm. Оптимальний для 'Малина': 40.0-70.0 ppm. Додаткове внесення зазвичай не потрібне.
Калій (K)	Середня потреба	Поточний показник: 100.0 ppm. Оптимальний для 'Малина': 130.0-220.0 ppm. Рекомендується внести додатково Калій (K).
Кислотність (pH)	Кислий ґрунт (потребує корекції)	Поточний показник: 5.9. Оптимальний для 'Малина': 5.5-6.5. Рекомендується вапнування.
Електропровідність (EC)	Дуже висока електропровідність	Поточний показник: 4000.0 µS/cm. Оптимальний для 'Малина': 800.0-1500.0 µS/cm. Рекомендується промивання ґрунту. Є ризик засолення або токсичності.

Загальні рекомендації

Добрива

Після завершення плодоношення малина потребує підживлення Азотними добривами для закладання плодкових бруньок на наступний рік та росту нових пагонів. Калій сприяє формуванню якісних, добре забарвлених та смачних ягід, а також підвищує зимостійкість рослин.

Особливості вирощування

Більшість сортів малини мають довгі пагони, які потребують підв'язки до опори. Це полегшує догляд за насадженнями, збору врожаю, покращує освітлення і провітрювання кущів, що знижує ризик розвитку хвороб.

Рисунок 3.9 – Вигляд порад та загальних рекомендацій щодо вирощування малини

Ще однією функцією для візуалізації є `st_echarts`, за допомогою якої дані з датчиків перетворюються у півколові індикатори. Для них можна налаштувати колір, наприклад, було зроблено зміни у кольору в залежності від показників: червоний – поганий стан, жовтий – потребує додаткової уваги, зелений – усе добре. Функція `render_gauge` працює разом із `st_echarts` для відображення індикаторів, обробляє можливі відсутні або некоректні значення, встановлює мінімальні та максимальні значення шкал, одиниці виміру. На рисунку 3.10 зображено вигляд індикаторів на сторінці режиму моніторингу.

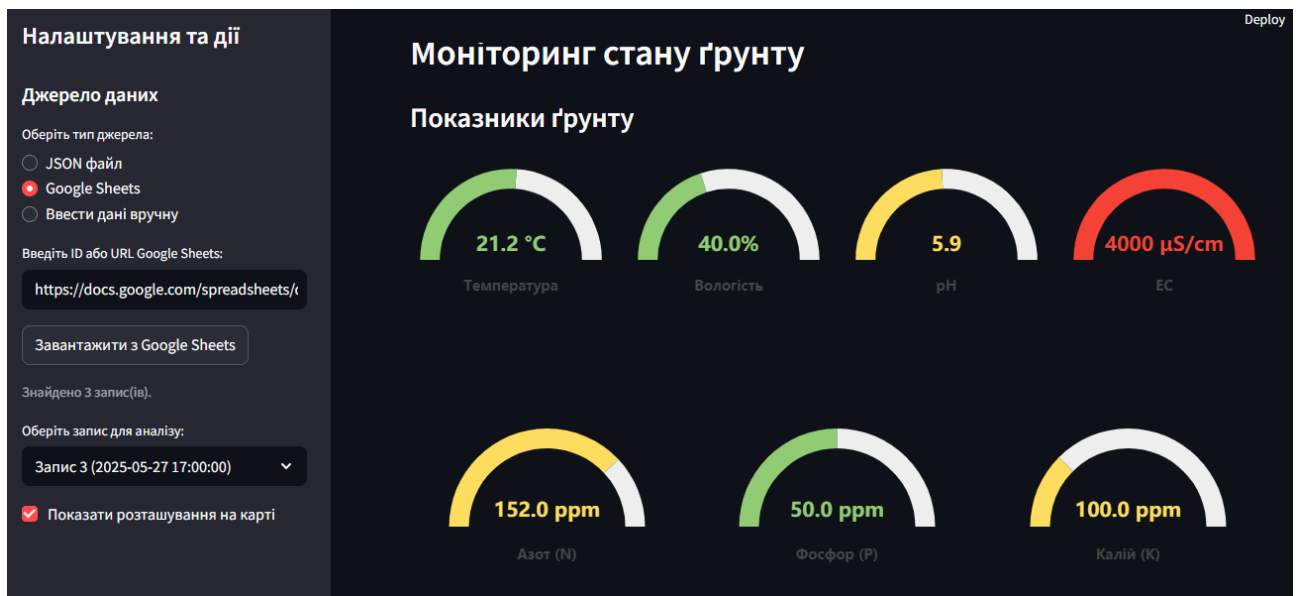


Рисунок 3.10 – Вигляд півколових індикаторів в залежності від показників ґрунту

Якщо в введених даних є координати, тоді знизу сторінки показується розташування датчика на карті за допомогою `st.map` (рис. 3.11).

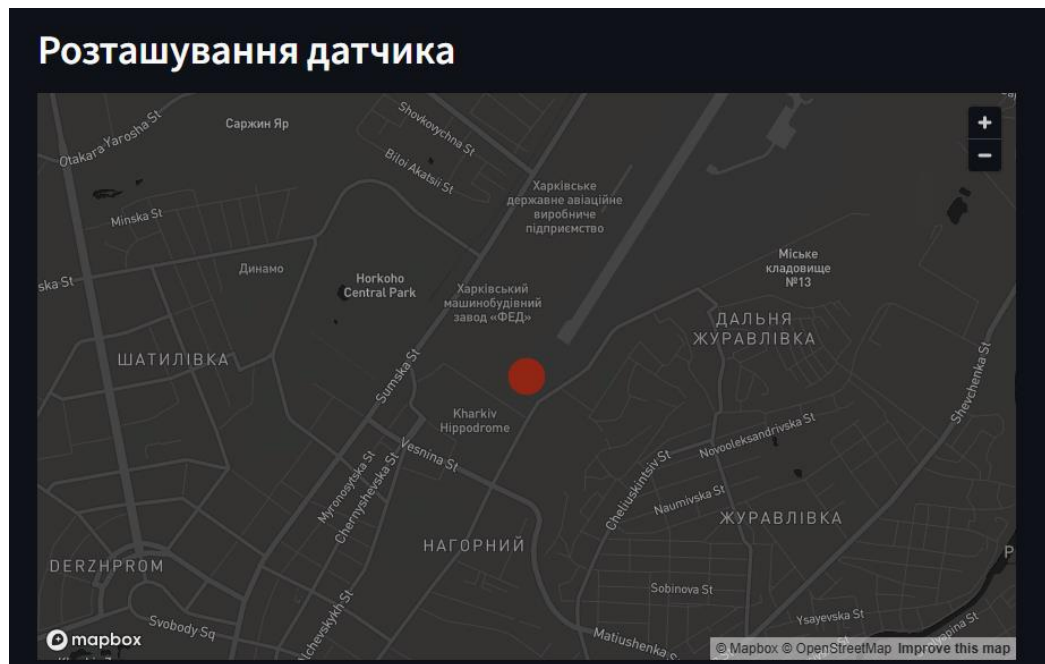


Рисунок 3.11 – Вигляд мапи знизу сторінки

Окрім головного файлу `app.py` з інтерфейсом та загальною логікою потоку даних, було розроблено модуль `analysis_logic.py`, він буде використовуватися для обробки даних про стан ґрунту і містити власну базу даних. Важливими бібліотеками є `pandas` та `joblib`.

Створюємо структуру `CROP_DATABASE` про різні сільськогосподарські культури, де буде зберігатися уся інформація. Потім ця база даних буде використовуватися для побудови рекомендацій. Для кожної культури тут зберігається її категорія, оптимальні діапазони рН, вміст Азоту, Фосфору, Калію, ЕС, а також текстові поради щодо внесення добрив та загальні особливості вирощування. Приклад коду для сої є на рисунку 3.12.

```
"Соя": {
    "category": "Бобові",
    "subcategory": "Зернобобові",
    "pH_optimal": (6.0, 7.0),
    "N_ppm_optimal": (20, 60),
    "P_ppm_optimal": (40, 70),
    "K_ppm_optimal": (80, 150),
    "EC_optimal": (1000, 2500),
```

Рисунок 3.12 – Частина коду `CROP_DATABASE`

Для підвищення точності рекомендацій щодо корегування параметрів ґрунту і потреб для конкретних культур буде використано машинне навчання. Завантажені моделі аналізують поточні дані, а потім порівнюють з прописаними раніше оптимальними. Якщо рівень параметру буде нижчий за оптимальний, тоді модель класифікуватиме це як «середня потреба» або «висока потреба». Система також враховує температуру і вологість для прогнозу. Функція `get_ml_prediction_for_parameter` є найголовнішою для машинного навчання. Вона приймає код параметра, назву культури та поточне значення. Після перевірки завантаження моделей, функція кодує назву культури, потім отримує прогноз моделі і у результаті формує текстову рекомендацію.

Генерація рекомендацій здійснюється за допомогою трьох основних функцій. Функція `get_ml_simplified_advice` генерує поради на основі прогнозів ML-моделей. Функція `get_rule_based_simplified_advice` генерує рекомендації на основі простих правил, порівнюючи поточні значення параметри ґрунту з оптимальними значеннями з бази даних. Основна функція `get_fertilizer_and_care_advice` бере всі попередні функції та формує повний набір рекомендацій для вибраної культури.

Для ранжування культур за придатністю до умов ґрунту використовується система балів, тобто, кожна культура отримує оцінку на основі того, наскільки умови зараз можуть відповідати значенню оптимального параметра. Чим більше балів, тим вища сумісність ґрунту та оцінюваної культури. Наприклад, якщо оцінюються томати, а наразі значення Фосфору у ґрунті становить 55 ppm, буде перевірятися чи потрапляє це значення у визначений для томатів діапазон. Якщо потрапляє, тоді культура отримує два бали, якщо значення вище або нижче, але все ще в межах від діапазону, тоді нараховується один бал. Якщо значення взагалі не підходить та далі від діапазону, тоді культура отримує нуль балів. Завдяки цьому формується список культур, який сортується за кількістю балів, а культури з найвищими балами показуються першими.

Файл `train_soil_models.py`, який вже був згаданий, призначений для створення та навчання моделей машинного навчання, які можуть класифікувати стан ґрунту для підбору сільськогосподарських культур. Він генерує штучні дані на основі оптимальних діапазонів для культур, а потім використовує ці дані для навчання моделей алгоритмом `RandomForestClassifier`.

Для обробки даних використовуються бібліотеки `pandas` та `numpy`, реалізація алгоритмів машинного навчання через бібліотеку `scikit-learn`, а для збереження навчених моделей – `joblib`; `sys` та `os` потрібні для взаємодії з операційною системою для обробки помилок виходу з програми та створення директорій.

Для кожної культури створюються п'ять сценаріїв, у яких значення параметра змінюється від дефіциту до надлишку. Робиться це шляхом множення оптимальних значень на обрані коефіцієнти для відхилень від норми для N, P, K, EC та додаванням або відніманням дельт – чверті ширини оптимального діапазону – для рН (рис. 3.13). Щоб навчити модель, дані діляться по відсотках: сімдесят навчальних та тридцять тестових вибірки.

```
if param_name in ["N", "P", "K"]:
    scenarios = [
        (opt_min * 0.5, config["categories"][0]),
        (opt_min * 0.8, config["categories"][1]),
        ((opt_min + opt_max) / 2, config["categories"][2]),
        (opt_max * 1.2, config["categories"][3]),
        (opt_max * 1.5, config["categories"][4])
    ]

if param_name == "EC":
    scenarios = [
        (opt_min * 0.3, config["categories"][0]),
        (opt_min * 0.7, config["categories"][1]),
        ((opt_min + opt_max) / 2, config["categories"][2]),
        (opt_max * 1.3, config["categories"][3]),
        (opt_max * 2.0, config["categories"][4])
    ]

elif param_name == "pH":
    delta = (opt_max - opt_min) / 4
    scenarios = [
        (opt_min - 2 * delta, config["categories"][0]),
        (opt_min - delta, config["categories"][1]),
        ((opt_min + opt_max) / 2, config["categories"][2]),
        (opt_max + delta, config["categories"][3]),
        (opt_max + 2 * delta, config["categories"][4])
    ]
```

Рисунок 3.13 – Сценарії для навчання моделі

Повний код наведено у додатках В-Д.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

При впровадженні системи автоматизації аналізу ґрунту на базі технології Інтернету речей потрібно дотримуватися правил безпеки, зокрема вимог до роботи з електронним обладнанням. Усі компоненти системи є низьковольтними пристроями, тому ризик ураження електричним струмом досить малий. Використання напруги не більше 12 В, робить систему безпечною для безпосереднього контакту, якщо дотримуватися базових правил експлуатації.

Для усіх електронних компонентів повинен бути передбачений герметичний корпус, який буде захищати їх від впливу навколишнього середовища, а так як система встановлюється у полі, то через пил та вологу є шанс виникнення короткого замикання, тому цим не можна нехтувати. Також усі налагоджувані роботи повинні проводитися при знеструмленій системі. Корпус повинен мати належну вентиляцію у місці розташування акумулятора та контролера заряду, бо вони можуть виділяти хоч мінімальне, але надлишкове тепло.

Усі кабелі, що використовуються, повинні мати якісні ізоляційні матеріали, не мати пошкоджень та підключатися відповідно технічним вимогам. У разі виникнення будь-яких ознак несправності, диму чи значного нагрівання корпусу потрібно відразу знеструмити усю систему. Також при сильному вітрі та під час грози не рекомендується використання системи через ризик впадіння сонячної панелі.

Розміщення системи у полі повинно бути таким, щоб її не було можливості пошкодити сільськогосподарській техніці чи тваринам. При встановленні, датчик повинен бути надійно зафіксованим. Компоненти рекомендується розташовувати зручно, якщо у разі несправності один чи декілька з них можна було замінити чи перевірити.

Користувачі системи не повинні втручатися у роботу мікроконтролера чи датчика без достатніх знань, самостійний ремонт заборонено, бо такі дії можуть

призвести як до пошкодження обладнання, так і до ураження електричним струмом чи пожежі.

Система не створює значного негативного впливу на навколишнє середовище з точки зору екологічної безпеки. Вона працює на низькому енергоспоживанні, використовує відновлюване джерело енергії. Але при утилізації компонентів системи після закінчення терміну їхньої служби, наприклад, літєво-іонного акумулятора, потрібно пам'ятати про відповідні правила і чинні норми, щоб запобігти забрудненню ґрунту чи води токсичними речовинами.

Уся система ґрунтується на принципах сталого розвитку, моніторинг та аналіз ґрунту з мінімальним екологічним слідом, було дотримано усіх аспектів безпеки. Датчик не порушує структуру ґрунту і не використовує хімічні реагенти.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було розроблено систему автоматизації аналізу ґрунту на базі технології Інтернету речей для підвищення ефективності аналізу вмісту ґрунту.

Були виконані наступні завдання:

- проведено аналіз методів та технологій існуючих систем автоматизації аналізу ґрунту;
- розроблено структурну схему та алгоритм роботи системи автоматизації аналізу ґрунту;
- проведено вибір компонентів системи автоматизації аналізу ґрунту;
- обрано мову та середовище програмування для реалізації системи у вигляді програмного засобу;
- розроблено схему підключення та програмний засіб, реалізовано передачу даних з мікроконтролера на сервіс Blynk;
- розраховано час автономної роботи системи від акумулятора та від сонячної батареї.

Результатом виконання кваліфікаційної роботи є програмний засіб, що реалізує систему автоматизації аналізу ґрунту на базі технології Інтернету речей. Система здатна здійснювати автономний збір, аналіз, передачу даних, також може надавати рекомендації на основі параметрів ґрунту.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. – 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, О.М. Цимбал, О.В. Токарева, А.І Бронніков. – Харків: ХНУРЕ, 2022. – 64 с.
3. Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk / M. Ayaz et al. 2019.
4. Агрохімічний аналіз – Словник агронома – SuperAgronom.com. URL: <https://superagronom.com/slovnik-agronoma/agrohimichniy-analiz-id19990> (дата звернення: 18.04.2025).
5. Дослідження складу, фізичних і фізико-хімічних властивостей ґрунтів: навчальний посібник / С.В. Корнеєнко, 2016. – 217 с.
6. Тензіометр (ґрунтознавство) – Вікіпедія. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Тензіометр_\(ґрунтознавство\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Тензіометр_(ґрунтознавство)) – (дата звернення: 18.04.2025).
7. Як визначити вологість ґрунту: способи та методи – AgroApp: швидке кредитування для агробізнесу. URL: <https://agroapp.com.ua/uk/blog/yak-viznachiti-vologist-gruntu-sposobi-ta-metodi> (дата звернення: 18.04.2025).
8. ГеоМетр Україна – системи точного землеробства, прилади для вимірювання площі полів, агронавігатори, курсовказівники. URL: <https://shop.gpsgeometer.com/ua/catalog/penetrometri-schilnomiri-gruntu> (дата звернення: 20.04.2025).
9. Measure with Spectrum! URL: <https://www.specmeters.com/Soil-Compaction-Tester> (дата звернення: 20.04.2025).

10. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Технічні засоби автоматизації» підготовки бакалавра спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: освітньо-професійні програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньо-професійні програми «Системна інженерія» / ХНУРЕ; розроб. Л. С. Іванов. – Харків, 2023. – 162 с.

11. TLS-100 Portable Thermal Conductivity Meter for Soil Testing. *Thermtest*. URL: <https://thermtest.com/tls-100> (дата звернення: 21.04.2025).

12. Кондуктометри для визначення електропровідності ґрунту. *APK.HLR*. URL: <https://apk.hlr.ua/obektyi-isledovaniya/pochva/pokazateli-kachestva/obshhee-solesoderzhanie-i-elektroprovodnost/konduktometryi/> (дата звернення: 20.04.2025).

13. Soil NPK sensors – leading environmental sensor solutions for businesses | XPS. URL: <https://sz-xps.com/soil-npk-sensors/> (дата звернення: 21.04.2025).

14. Методичні рекомендації до вивчення теми «Інфрачервона спектроскопія» з дисципліни «Фізичні методи дослідження речовини» для студентів спеціальностей 102 «Хімія», 014 «Середня освіта (Хімія)» / Укладачі доц. Юрченко О.М., проф. Кормош Ж.О., доц. Савчук Т.І., доц. Корольчук С.І. – Луцьк: ФОП Іванюк В.П. – 80 с.

15. Сенсори для точного землеробства – iFarming. URL: <https://ifarming.ua/monitoring/sensory-dlya-tochnogo-zemlerobstva> (дата звернення: 20.04.2025).

16. Фершал М.В. Аналітичні сенсорні системи: навчальний посібник / Укладач: М.В. Фершал. – Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2022. – 220 с.

17. Біосенсор – Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Біосенсор> (дата звернення: 20.04.2025).

18. Introduction to biosensors / N. Bhalla et al. *Essays in biochemistry*. 2016. Vol. 60, no. 1. P. 1–8.

19. Біосенсори у сільському господарстві: контроль якості ґрунту та рослин. URL: <https://mindscope.biz.ua/biosensory-dlya-kontrolyu-yakosti-gruntu-ta-roslyn-novi-perspektyvy-u-silskomu-gospodarstvi/> (дата звернення: 21.04.2025).

20. What is precision agriculture? Methods and applications – agrierp blog. URL: <https://agrierp.com/blog/precision-agriculture> (дата звернення: 21.04.2025).

21. Точне землеробство в Україні: визначення та перспективи – WEAGRO. URL: <https://weagro.com.ua/blog/tochne-zemlerobstvo-v-ukrayini-vyznachennya-ta-perspektyvy/> (дата звернення: 21.04.2025).

22. З точністю до сантиметрів: що таке GNSS і GPS сигнали та яка між ними різниця | Kyivstar Business Hub. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/z-tochnisty-do-santimetriv-shho-take-gnss-i-gps-signali-ta-yaka-mizh-nimi-rizniczya> (дата звернення: 21.04.2025).

23. How Can GPS be Used in Precision Farming – Geoforce. URL: <https://www.geoforce.com/how-can-gps-be-used-in-precision-farming/> (дата звернення: 21.04.2025).

24. Сергєєва К. ГІС-Технології в Сільському Господарстві та Їх Використання. EOS Data Analytics. URL: <https://eos.com/uk/blog/his-tekhnologii-v-silskomu-hospodarstvi/> (дата звернення: 21.04.2025).

25. Як працює ГІС. Кафедра земельного адміністрування та геоінформаційних систем | ХНУМГ ім.О.М.Бекетова. URL: <https://gis.kname.edu.ua/?view=article&id=68:yak-pratsyue-gis&catid=2> (дата звернення: 21.04.2025).

26. Remote sensing in precision agriculture. Home | Ohioline. URL: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-5541> (дата звернення: 21.04.2025).

27. Проф., д-р Петро Когут. Види Дистанційного Зондування: Переваги та Застосування. EOS Data Analytics. URL: <https://eos.com/uk/blog/vydydystantsiinoho-zonduvannia/> (дата звернення: 21.04.2025).

28. Невлюдов І. Ш. Node-RED та технологія промислового Інтернету речей [Електронний ресурс]: навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, С. П. Новоселов, О. В. Сичова; М-во освіти і науки України ; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2024. – 207 с.

29. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Проектування Web-додатків для автоматизованих систем» підготовки бакалавра спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс]: освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / ХНУРЕ; розроб. А. І. Бронніков. – Харків, 2022. – 361с.

30. Технології інтернету речей. Навчальний посібник для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І.О. Зенів. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.

31. Інтернет речей: LoRa. URL: <https://lanmarket.ua/ua/stats/internet-veshchey-lora-ustroystva-ot-mikrotik/> (дата звернення: 21.04.2025).

32. Технології Інтернету речей в управлінні пристроями на мікроконтролерах [Електронний ресурс] : навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, В. А. Андрусевич, С. П. Новоселов, О. Г. Резніченко; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – електрон. вид. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – 214 с.

33. Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1. – 262с.

34. Fasal – Grow more, grow better. URL: <https://fasal.co/> (дата звернення: 21.04.2025).

35. Agriculture sensors in precision farming – their types and use case. URL: <https://blog.fasal.co/2022/08/31/agriculture-sensors-in-precision-farming/> (дата звернення: 21.04.2025).

36. Digital Farming decisions and insights to maximize every acre. URL: <https://www.climatefieldview.ca/> (дата звернення: 21.04.2025).

37. Get your data in one place. Digital Farming decisions and insights to maximize every acre. URL: <https://www.climatefieldview.ca/features/get-your-data-in-one-place/> (дата звернення: 21.04.2025).

38. SoilReader – універсальний дослідник ґрунту // iFarming. URL: <https://ifarming.ua/monitoring/soilreader-universalnyj-doslidnyk-gruntu> (дата звернення: 21.04.2025).

39. Bedord L. New device unearths critical details in the dirt in real time. Successful Farming. URL: <https://www.agriculture.com/technology/crop-management/new-device-unearths-critical-details-in-the-dirt-in-real-time> (дата звернення: 21.04.2025).

40. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Проектування систем автоматизації» підготовки бакалаврів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології: освітня програма «Системна інженерія» / ХНУРЕ ; розроб. С. В. Сотник. – Харків, 2022. – 160 с.

41. Використання сучасних систем моніторингу обладнання у сільському господарстві SprayForce. URL: <https://sprayforce.com.ua/blog/agrotekhnologii/vikoristannya-suchasnikh-sistem-monitoringu-obladnannya-v-silskomu-gospodarstvi/> (дата звернення: 01.05.2025).

42. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Основи проектування та САПР» підготовки бакалавра, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс]: освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / ХНУРЕ; розроб. М. Г. Стародубцев. – Харків, 2023. – 387 с.

43. Arduino MKR WAN 1310. Arduino Official Store. URL: https://store.arduino.cc/products/arduino-mkr-wan-1310?_s=_s-c-u (дата звернення: 09.05.2025).

44. WiFi LoRa 32(V3), ESP32S3 + SX1262 LoRa Node, Meshtastic and LoRaWAN Compatible. Heltec Automation. URL: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/> (дата звернення: 09.05.2025).

45. NUCLEO-WL55JC – STMicroelectronics.
URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-wl55jc.html> (дата звернення: 09.05.2025).
46. RS485 4-20ma soil temperature humidity moisture conductivity EC PH sensor color: NPKPHCTH-S. URL: <https://uquid.com/shop/product/rs-ma-soil-temperature-humidity-moisture-conductivity-ec-ph-sensor-color-npkphcth-s-igmrTpBADmdSy> (дата звернення: 09.05.2025).
47. Перетворювач інтерфейсу RS485 – UART TTL. Мій Проект.
URL: <https://myproject.com.ua/peretvorjuvach-interfejsu-rs485-uart-ttl-ua.html> (дата звернення: 09.05.2025).
48. Акумулятор літієво-полімерний Li-Pol 3000mAh 3.7v Alpha Power. URL: https://alphapower.com.ua/ua/p1901697771-akkumulyator-litij-polimernyj.html?srsId=AfmBOoqIHc6fz9I_B1Famp147jHvxABoc9NpTsvyZZc_gjZL-ivGPhCpeaw (дата звернення: 09.05.2025).
49. Сонячна панель 6в/6вт 210x165мм. Arduino в Україні.
URL: <https://arduino.ua/prod6013-sonyachna-panel-6v10vt-210x165mm> (дата звернення: 09.05.2025).
50. Модуль заряду Li-Ion TP4056 Type-C // Mini-Tech.
URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/modul-zaryada-li-lon-tp4056-type-c> (дата звернення: 09.05.2025).
51. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. - Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.
52. Welcome to Wokwi! | Wokwi Docs. URL: <https://docs.wokwi.com/> (дата звернення: 10.05.2025).
53. Introduction | Blynk Documentation. URL: <https://docs.blynk.io/en> (дата звернення: 10.05.2025).
54. Microsoft. Visual Studio Code – Code Editing. Redefined. URL: <https://code.visualstudio.com/> (дата звернення: 10.05.2025).

55. Welcome to Python. URL: <https://www.python.org/> (дата звернення: 10.05.2025).

56. Streamlit Docs. Streamlit documentation. URL: <https://docs.streamlit.io/> (дата звернення: 10.05.2025).