

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій  
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
Ступінь вищої освіти "магістр"

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

\_\_\_\_\_ А.І.Сергін  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
Геляс Сергій Ігорович  
(прізвище, ім'я по-батькові)

**1. Тема випускної кваліфікаційної роботи**

\_\_\_\_\_ Комп'ютерно-інтегрована система збору та передавання даних на метеорологічній станції / Computer-integrated data collection and transmission system at the meteorological station \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ керівник роботи \_\_\_\_\_ д.т.н., професор Н.Я.Возна \_\_\_\_\_

затверджені наказом по університету від 8 грудня 2022 р. № 491

**2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи:**

30 листопада 2023р.

**3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:**

1. Класифікація метеорологічних станцій \_\_\_\_\_
2. Аналіз сучасних технологій передавання даних \_\_\_\_\_
3. Типи обладнання для вимірювання вологості та кислотності ґрунту \_\_\_\_\_

**4. Основні питання, які потрібно розробити:**

1. Аналіз метеостанцій та методів передавання даних \_\_\_\_\_
2. Визначення контрольованих параметрів та вибір типів обладнання \_\_\_\_\_
3. Практична реалізація комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання даних на метеорологічній станції \_\_\_\_\_

**5. Перелік графічного матеріалу у роботі:**

1. Структурна схема системи збору та передавання даних \_\_\_\_\_
2. Схема етапів роботи системи \_\_\_\_\_

## 6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
2	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		
3	Возна Н.Я. д.т.н., професор, професор кафедри СКС		

## 7. Дата видачі завдання 20 жовтня 2022р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз метеостанцій та методів передавання даних	11.2022р. – 12.2022р.	
2	Визначення контрольованих параметрів та вибір типів обладнання	01.2023р. – 04.2023р.	
3	Практична реалізація комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання даних на метеорологічній станції	04.2023р. – 10.2023р.	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Геляс С.І.

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

д.т.н., проф. Возна Н.Я.

## РЕФЕРАТ

Робота виконана на 68 сторінках та містить 33 рисунки, 7 таблиць, 36 джерел за переліком посилань.

**Мета роботи.** Метою роботи є проектування комп'ютерно-інтегрованої, економічно доцільної системи збору та передавання інформації про вологість та кислотність ґрунту.

**Результати роботи.** Спроектовано та реалізовано економічно ефективну автоматичну метеостанцію з автономним живленням від сонячної панелі, яка вимірює та передає дані про вологість та кислотність ґрунту на досліджуваному полі без необхідності йти на станцію.

**Рекомендації по використанню результатів роботи.** Розроблена комп'ютерно інтегрована система збору та передавання даних з метеостанції на основі датчиків вологості та кислотності ґрунту, дозволяє моніторити та фіксувати кореляцію стану ґрунту, відповідно до отриманих даних приймати агротехнічні рішення.

Результати роботи служитимуть інструментом для ефективнішого контролю за станом сільськогосподарських угідь з метою підвищення урожайності.

**Ключові слова:** КОНТРОЛЬ, СИСТЕМА ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАВАННЯ, МОБІЛЬНА МЕТЕОСТАНЦІЯ, СТАН ГРУНТУ.

## ABSTRACT

Work is executed on 68 pages and including 33 illustrations, 7 table, 36 sources after the list of references.

**Purpose of work.** The purpose of the work is to design a computer-integrated, economically feasible system for collecting and transmitting information about soil moisture and acidity.

**Job performances.** An economically efficient automatic weather station with autonomous power from a solar panel was designed and implemented, which measures and transmits data on soil moisture and acidity in the studied field without the need to go to the station.

**Recommendations after the use of job performances.** The developed computer-integrated system for collecting and transmitting data from the weather station based on humidity and soil acidity sensors allows monitoring and fixing the correlation of the soil condition, and making agrotechnical decisions based on the received data.

The results of the work will serve as a tool for more effective control over the state of agricultural land in order to increase productivity.

**Keywords:** CONTROL, COLLECTION AND TRANSMISSION SYSTEM, MOBILE WEATHER STATION, SOIL CONDITION.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ.....	7
ВСТУП .....	8
1. АНАЛІЗ МЕТЕОСТАНЦІЙ ТА МЕТОДІВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ...	10
1.1 Аналіз метеорологічних станцій .....	10
1.2 Система живлення для метеостанції.....	17
1.3 Технології передавання даних для мобільних метеорологічних станцій .....	18
1.4 Особливості роботи MQTT протоколу.....	21
1.5 Постановка завдань дослідження.....	25
2. ВИЗНАЧЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВИБІР ТИПІВ ОБЛАДНАННЯ .....	26
2.1. Властивості ґрунту та методи їх аналізу .....	26
2.2 Типи обладнання для вимірювання вологості та кислотності ґрунту...	33
2.3 Обґрунтування компонентів проєктованої системи.....	37
2.4 Розробка структурної схеми та алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання інформації про стан ґрунту...	44
3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ НА МЕТЕОРОЛОГІЧНІЙ СТАНЦІЇ .....	48
3.1 Вибір технічних засобів системи збору та передавання даних.....	48
3.1.1 Вибір плати Arduino .....	48
3.1.2. Вибір датчика кислотності (рН).....	50
3.1.3 Вибір датчика вологості ґрунту.....	53
3.1.4 Вибір сонячної станції.....	55
3.1.5. Вибір GPS\GPRS модуля.....	56
3.2 Розробка програмного коду для системи збору та передачі даних про стан ґрунту .....	58

ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТОК А Копії публікацій.....	

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

pH – кислотність ґрунту;

ЗВ – запаси вологи;

NDVI - Нормалізований диференційний вегетаційний індекс;

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція;

GPRS - технологія передачі даних;

MQQT - протокол мережевої передачі даних;

GPS - система навігації та геопозиціювання;

TDR - методом вимірювань у часовій області;

FDR - методом вимірювань у частотній області;

АКБ – акумуляторна батарея.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток сільського господарства тісно пов'язаний із використанням інноваційних рішень для оптимізації виробничих процесів при вирощуванні сільськогосподарських культур. Тому застосування датчиків, сенсорів та модулів для відстеження ключових факторів, таких як: температура, швидкість вітру, кислотність ґрунту, вміст вологи, рух техніки в полі при виконанні технологічних операцій в полі надає фермеру можливість швидко виявляти та реагувати на зміни, від яких безпосередньо залежить майбутній врожай.

Провівши первинний аналіз рішень, які надає ринок для комерційної діяльності сільськогосподарських підприємств [1-4], вирішено спроектувати тестову автономну комп'ютерно-інтегровану систему збору даних про стан ґрунту, а саме вологість та кислотність, після цього передавати інформацію з дослідних ділянок, де є доступне покриття стільникової мережі з використанням технологій дальньої дії на сервер.

Зазначений підхід спрямований на розробку системи моніторингу за допомогою використання стандарту GPRS та протоколу передачі даних MQTT.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є проектування комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання інформації про вологість та кислотність ґрунту.

Для досягнення мети в ході досліджень вирішувалися кілька завдань, основними з яких є:

- аналіз публікацій про моніторинг стану ґрунту;
- аналіз інформації про використання альтернативних джерел живлення для можливості безперебійної роботи системи на дослідних ділянках;
- підбір відповідних комплектуючих (сенсорів, модулів) для проектування комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання інформації;
- обґрунтування використання Arduino для якісної і стабільної роботи локального MQTT сервера;
- моделювання автономного мобільного пристрою із модулем



вимірювання вологості та кислотності ґрунту;

- налаштування контролера Arduino.

**Об'єкт дослідження.** Система контролю стану ґрунту у сфері сільськогосподарського виробництва.

**Предмет дослідження.** Система збору та передачі даних про вологість та кислотність ґрунтів.

**Наукова новизна одержаних результатів.** В результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено та спроектовано комп'ютерно-інтегровану систему збору та передачі даних метеостанції на основі контролера Arduino для оцінювання властивостей ґрунту з автономним живленням та мінімальною собівартістю.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати роботи використовуються в польових умовах у сфері сільськогосподарського виробництва.

**Апробація.** 1. Геляс С.І. Дослідження автоматизації технологічного процесу пекарні / С.І. Геляс // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ – 2021), Тернопіль, 2021. – С. 64-67.

2. Геляс С.І. Розроблення структурної схеми та алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання даних про стан ґрунту / С.І. Геляс, О.С. Долинюк, В.Б. Макогін // Збірник матеріалів науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів «Кібербезпека та комп'ютерно-інтегровані технології» (КБКІТ - 2023), Тернопіль, 2023. - С. 164-167.

# 1. АНАЛІЗ МЕТЕОСТАНЦІЙ ТА МЕТОДІВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

## 1.1 Аналіз метеорологічних станцій

Збір та обробка метеоданих, являє собою процес спостереження за погодними показами необхідними для опису, аналізу та прогнозу погоди. Після збору, ці дані піддаються обробці за допомогою вузькоспеціалізованих правил та алгоритмів спеціалістами-агрономами, які на підставі цих даних приймають рішення щодо внесення добрив, поливу та інших операцій з рослинами. Інформація може бути отримана за допомогою супутників, зондів та метеорологічних станцій [5-8].

Однією із основних складових високого врожаю є погода. Тому можливість уважно стежити за нею є надзвичайно важливою для визначення термінів посіву, планів обробки, графіків зрошення тощо.

Як правило, інформація про погодні явища у західних областях України надходить із централізованих джерел, де метеорологи інтерпретують дані для великих географічних територій. Зазвичай, дані надходять з однієї метеостанції в найближчій геозоні. Фактична погода на землі може сильно відрізнятись, навіть на відстані кількох кілометрів. І, звичайно, навіть кілька градусів різниці в температурі або міліметри опадів мають наслідкові зв'язки при вирощуванні рослин.

Метеорологічні спостереження в Україні організовує Державна гідрометеорологічна служба [5, 8]. Усі спостереження здійснюються одночасно й однотипними приладами за єдиною програмою та методикою. Сучасна метеорологічна мережа в Україні складається із 188 метеорологічних станцій II-го розряду. Актинометричні спостереження проводяться на 16 станціях, на 7 станціях виконуються тепло балансові спостереження. Спостереження з використанням радіолокаторів, які дають змогу фіксувати атмосферні явища у радіусі 300 км, проводяться на 8 станціях і охоплюють усю територію України.

Природне середовище, в якому проводяться метеорологічні спостереження, характеризується багатьма динамічними фізичними

параметрами. Тому метеорологічні вимірювальні прилади перебувають не лише під впливом вимірюваної величини, а й під впливом інших параметрів середовища, що може істотно вплинути на результати спостережень. Уникнути сторонніх впливів можна шляхом використання додаткових пристроїв для їх нейтралізації або приведенням показів до так званих нормальних, єдиних для даного виду вимірювань умов.

Метеорологічні прилади використовуються в різних природних зонах, включно з віддаленими та важкодоступними пунктами. Тому практично до всіх метеорологічних приладів, що працюють у природному середовищі, висувуються вимоги безвідмовної роботи за температур від  $-30$  до  $+42^{\circ}\text{C}$ , за умов високої вологості, під час випадання твердих або рідких опадів, утворення туманів, високого рівня забруднення повітря тощо. Крім цього, необхідною є надійність приладів під час експлуатації та можливість їх транспортування за потреби [9, 10].

Для забезпечення однотипності та достовірності результатів вимірювань усі метеорологічні прилади з певною періодичністю перевіряються (калібруються) [9]. Повірка приладів зводиться до визначення поправок за шкалою приладу, що отримані при вимірюванні метеорологічної величини, чи значень перевідних коефіцієнтів. Такі дані отримують шляхом порівняння показників обладнання до еталонного зразка. За результатами перевірки видається свідоцтво, в якому вказують величини поправок чи перевідних множників. Повірка метеорологічних приладів в Україні виконується структурним підрозділом Гідрометеорологічної служби.

Усі метеорологічні спостереження (за деякими винятками) проводяться на метеорологічному майданчику як показано на рисунку 1.1, тому правильний вибір місця для його облаштування, стандартне розташування приладів та обслуговування майданчика значною мірою зумовлюють якість результатів спостережень.



Рисунок 1.1 — Метрологічний майданчик

Для отримання репрезентативної інформації метеорологічний майданчик необхідно облаштовувати на відкритій, типовій для даної місцевості ділянці.

Стандартний метеорологічний майданчик повинен мати форму квадрата зі стороною 26 м, одна зі сторін якого орієнтована з півдня на північ. За розширеної програми (актинометричні спостереження) – розміри майданчика 26×36 м, у разі, коли обсяг спостережень менший за стандартний, розміри можуть бути зменшені до 20×16 м.

Відстань від майданчика до невисоких будівель чи дерев має бути не меншою від їхньої 10-кратної висоти, а відстань до суцільної забудови та лісових масивів – не меншою від 20-кратної. Від ярів та урвищ майданчик має бути віддаленим на десятки метрів, а від природної водойми – не менш ніж на 100 м. В таблиці 1.1 наведено величини, по яких ведеться облік на метеомайданчиках.

Таблиця 1.1 - Одиниці метрологічних величин

Назва величини		Одиниця вимірювання	
		Назва	Позначення
1	Температура, $t$	градус Цельсія/ Кельвін	°С/ К
2	Відносна вологість	відсоток	%
3	Парціальний тиск водяної пари, $E$	гектопаскаль	гПа
4	Дефіцит насичення, $d$	гектопаскаль	гПа
5	Температура точки роси, $t_d$	градус Цельсія	°С
6	Швидкість випаровування	міліметр за секунду	мм/с
7	Атмосферний тиск, $P$	гектопаскаль	гПа
8	Кількість опадів	міліметр	мм
9	Інтенсивність опадів	міліметр за хвилину	мм/хв
10	Швидкість вітру	метр за секунду	м/с
11	Напрямок вітру	градус, румб	°, румб
12	Метеорологічна дальність видимості (МДВ)	метр (кілометр)	м (км)
13	Потік сонячної радіації, $I$	ват на квадратний метр.	Вт/м <sup>2</sup> , (Дж×с)/м <sup>2</sup>
14	Тривалість сонячного сйва	година	год
15	Висота снігового покриву	сантиметр	см
16	Щільність снігу	грам на кубічний сантиметр	г/см <sup>3</sup>
17	Діаметр (товщина)	міліметр	мм

Для визначення висотного положення приладів і, зокрема, барометра в межах майданчика встановлюється репер (точка висоти). На метеомайданчику має бути проведено стаціонарне освітлення.

На майданчику зберігається природний рослинний покрив, дозволяється підходити до приладів лише по доріжках, огорожа дослідного полігону та все допоміжне обладнання (підставки, будки, драбинки тощо) фарбується у білий колір з метою зниження їх нагрівання, а отже, зменшення впливу на метеорологічні величини.

Результати приземних метеорологічних спостережень, що проводяться на мережі метеорологічних станцій України, мають бути репрезентативними для локації, в якій вони розташовані. Мережу станцій необхідно створювати таким чином, щоб за її мінімальної густини для будь-якого пункту території між

станціями можна було за допомогою інтерполяції отримати з необхідною точністю значення будь-якої з основних метеорологічних величин. Це може бути забезпечено шляхом раціонально побудованої мережі репрезентативних станцій, які відображають місцеві особливості метеорологічного режиму і клімату території. На території України функціонує 188 метеорологічних станцій, що рівномірно розташовані по території

Вимірювання температури часто використовуються для визначення градусних днів росту (NDVI). Це вимірювання можна використовувати для прогнозування стадій росту на основі термінів посіву та погоди після технологічних операцій. Нижчі температури означають менше NDVI. Використання більш точної інформації про температуру з полів на відміну від температур, отриманих за кілометри від вас, може мати кореляцію при обчисленні стадій росту за допомогою вегетаційного індексу.

В загальному випадку метеостанції можна класифікувати наступним чином (рисунок 1.2) [5, 7, 8].



Рисунок 1.2 - Класифікація метеорологічних станцій.

За функціональністю метеостанції поділяються на станції для вимірювання базових метеорологічних параметрів та станції для вимірювання додаткових функцій.

Метеостанції для вимірювання базових метеорологічних параметрів, таких

як температура, вологість, тиск і вітер. Метеостанції з додатковими функціями можуть включати вимірювання сонячної радіації, дощу, снігу, грози та інші специфічні параметри.

За розташуванням: повітряні метеостанції, розташовані на полігонах, дахах будівель або інших високих місцях для вимірювання атмосферних параметрів у вільному повітрі.

За застосуванням: метеостанції для агропромисловості використовуються для прогнозування погодних умов для сільськогосподарських потреб; метеостанції для морського та повітряного транспорту, які забезпечують інформацію для безпечного руху суден та літаків; метеостанції для науково дослідних пунктів.

За обладнанням: автономні метеостанції, які працюють безпосередньо в полі та можуть використовувати сонячні панелі для живлення; метеостанції, підключені до мережі, які надсилають дані через Інтернет або інші зв'язкові засоби.

Автономна метеостанція – це метеорологічна станція, яка містить первинний набір датчиків та сенсорів, які забезпечують вимірювання та обробку метеорологічних даних через регулярні попередньо встановлені інтервали часу та автоматичної передачі їх на сервер для можливості інтерпретації даних відповідно прописаних алгоритмів.

Автономні метеостанції мають деякі додаткові переваги перед звичайними метеорологічними центрами:

- якість даних не залежить від користувача;
- станції можна встановити у віддалених місцях;
- дані беруться та передаються одночасно всією мережею;
- частоту даних можна збільшити відповідно до потреб збору;
- однорідність мереж може бути забезпечена шляхом стандартизації вимірювання;
- дані доступні поза звичайним робочим часом;
- знижує операційні витрати шляхом зменшення кількості спостерігачів;



- справність станцій можна контролювати централізовано.

До недоліків такої станції можна віднести:

- втрата даних через саботаж (крадіжка сонячної панелі, батареї тощо)

Агрометеорологічні станції фіксують дані, спостерігаючи за погодними умовами в тому чи іншому регіоні, і регулярно передають інформацію в локальну базу на сервері.

Також, значної популярності у застосуванні здобули мобільні системи моніторингу з оперативною відправкою даних на сервер. На відміну від стаціонарних великих станцій, які були популярні раніше, діапазони вимірювань таких станцій вважаються достатнім для прийняття відповідних рішень. Оскільки сучасне обладнання надає можливість використовувати більш економні пристрої, з достатньою точністю та за прийнятною вартістю.

Наприклад агрометеорологічні станції вимірюють необхідні аграріям дані. Серед цих даних температура, вологість, швидкість вітру, сонячна радіація, вологість ґрунту, кислотність, опади та інші природні параметри. Візуально, автономна метеостанція може мати наступний вигляд, як показано на рисунку 1.3.



Рисунк 1.3 — Зовнішній вигляд автономної метеостанції.



Переваги мобільної метеостанції над метеорологічним майданчиком:

- дані в реальному часі;
- точні показники певної локації;
- отримання інформації без необхідності переміщення в контрольоване місце;
- зменшення споживання енергії.

## 1.2. Система живлення для метеостанції

У минулі часи метеостанції живилися від двох джерел енергії, тобто електроенергії або батареї. Через це є дві основні проблеми. Перша проблема полягає в тому, що не можна розгортати метеостанцію в будь-якій місцевості, де немає лінії електропередачі. Друга проблема полягає в тому, що під час використання батареї для живлення метеостанції її слід замінювати. На жаль, дані можуть бути втрачені протягом цього часу.

Рішення із метеостанцією на сонячних батареях має перевагу у здатності забезпечувати енергію протягом тривалого часу. Оскільки сонячні системи є одними із найбільш надійних джерел живлення для тривалого використання. Вона може мати наступний вигляд, як показано на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 — Метеостанція на сонячних батареях.

Як правило, метеостанції на сонячних батареях складаються з кількох компонентів. Основними компонентами є сонячні панелі, зарядний пристрій і батарея.

Сонячні панелі живлять станцію протягом годин денного світла і в той самий час заряджають прикріплену акумуляторну батарею, яка потім використовується для живлення станції після заходу сонця.

### 1.3 Технології передавання даних для мобільних метеорологічних станцій

Технологія GPRS була одним із кроків до розвитку мобільного Інтернету та стала основою для подальших технологічних рішень в мережах мобільного зв'язку, яка представляє собою еволюцію стандарту GSM (Global System for Mobile Communications). GPRS стандарт був розроблений для покращення передачі даних та додавання можливостей для широкого доступу до Інтернету [11]. Сама аббревіатура GPRS розшифровується як General Packet Radio Service, дослівно це буде означати «основна служба пакетного радіо». Цей стандарт використовує смугу частот, яка не зайнята аудіо зв'язком.

Станом на 2023 рік найновішим стандартом, який охоплює 90% країни є 4G/LTE. Проте для системи, яка буде працювати на далеких відстанях варто використовувати технологію з більшим радіусом дії. Для прикладу, тут підходить стандарт 2G. Він використовує технологію GSM для аудіо дзвінків та надсилання SMS, а також технологію GPRS для доступу до мережі Інтернет.

Під час використання GPRS збереження інформації відбувається в пакетах та транслюється з дією неактивних в цей момент голосових каналів. Це дає можливість використовувати мережеві ресурси GSM більш доцільно.

Варто підмітити, що у даній технології присутні й недоліки у тому, що потужності трафіку при здійсненні голосових дзвінків мають основний пріоритет, а саме, якщо базова станція буде завантажена аудіо каналом, тоді пакети інтернет-трафіку матимуть понижену швидкість передачі даних. На це впливатиме не лише обладнання базової станції, а й навантаження на неї у певний момент часу. Проте посилити швидкість передачі даних, можна за

допомогою використання багатьох каналів однієї смуги одночасно. Якщо дивитися із теоретичної сторони, то коли всі таймери TDMA зайняті, це надає можливість прискорити передачу інформації до показника у 171,2 кбіт / с. При роботі це значення значно менше, проте для використання інтернет речей з передачею інформації за допомогою протоколу MQTT таких показників є достатньо [12, 13]. Це дає можливість системам працювати віддалено із мінімальною затримкою передачі даних до 10 секунд. Є різні види GPRS стандарту, які передбачають поєднання голосових дзвінків із передачею даних.

В залежності від розміщення вишок стільникового зв'язку, пакети даних шифруються, оскільки технології GPRS використовує GMSK модуляцію. Це значить, що дані кодуватимуться однією з чотирьох кодових схем CS1-CS4, оскільки вони переслані за допомогою радіоефіру. Всі ці схеми об'єднують цілісність основної інформації та зменшення впливу зовнішніх факторів. На стабільність радіо сигналу впливає віддаленість від базової станції, тому схема мережа вибирає в автоматичному режимі.

Для прикладу топологію мережі із використанням технології GPRS відображено на рисунку 1.5.

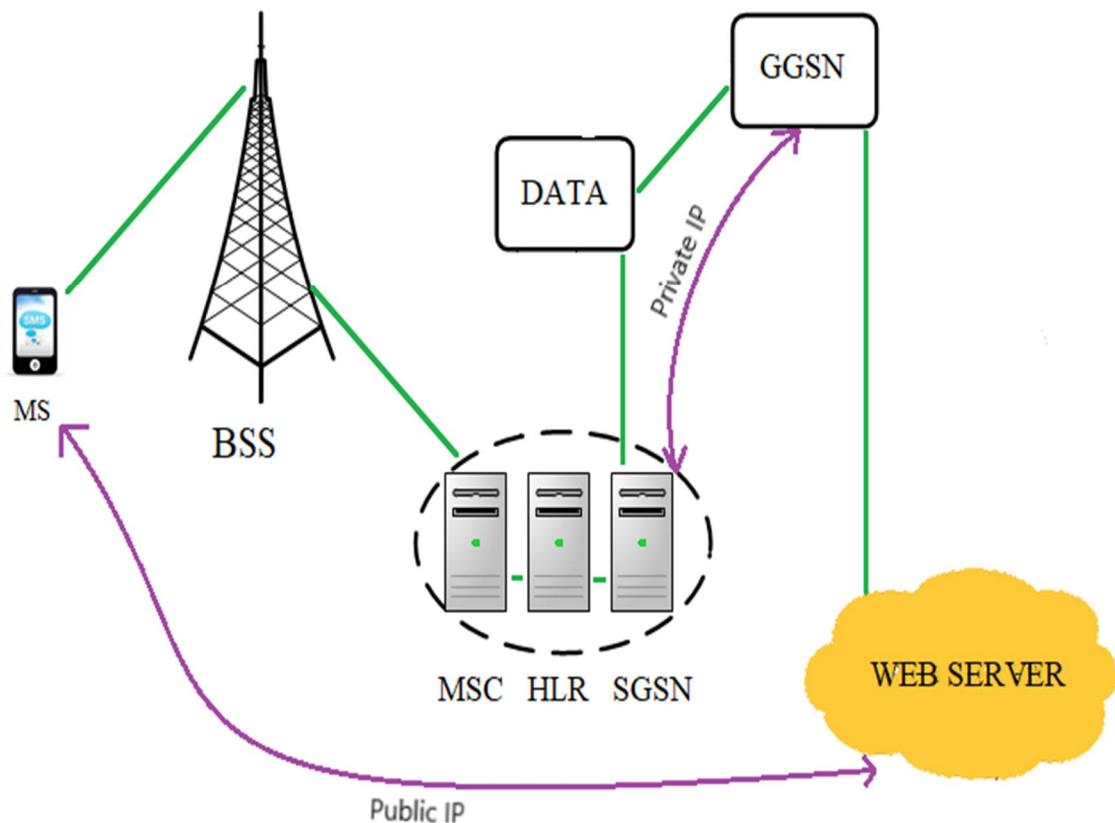


Рисунок 1.5 — Спрощена топологія мережі GPRS

MSC (Mobile Switching Center) - це ключовий компонент мережі мобільного зв'язку, особливо в системах мобільного зв'язку стандартів GSM (Global System for Mobile Communications) і другого покоління (2G) мереж. За її допомогою здійснюється з'єднання та перемикання між абонентами в системах з мережею GSM.

HLR - є базою даних, для зберігання і керування інформацією про всіх абонентів мережі. Він є центральним елементом в інфраструктурі мережі мобільного зв'язку і відіграє важливу роль в обробці зв'язку та наданні абонентам доступу до різних послуг і функцій.

Тут зберігаються всі ідентифікатори SIM-карт, а також номери телефонів абонентів для кожного оператора мобільного зв'язку. Оператори, які мають велику клієнтську базу, можуть встановити кілька HLR, кожен з яких зберігає лише невелику частину даних абонентів оператора, який їх має. Це можна пояснити обмеженнями апаратного та програмного забезпечення цих баз, а також обмеженнями місткості кожного HLR. Дані, які зберігаються в цьому модулі, включають дані про послуги, які надає оператор відповідно до тарифних планів. Ці дані включають пакет обмежень на швидкість підключення, кількість можливих, які можуть проходити одночасно, тарифний план, час обмеження підключення та стратегічність надання послуг. Крім того, HLR включає параметри підключення до технології GPRS, поточного абонента та інформацію про останнє підключення до базової станції. HLR взаємодіє з іншими компонентами системи, такими як шлюз MSC, який обробляє вхідні дзвінки та передачу даних; VRL, який обробляє запити всіх мобільних пристроїв, які будуть підключені до мережі; SMSC, який обробляє вхідні SMS повідомлення; і служба голосової пошти, яка обробляє нові повідомлення про надходження голосових повідомлень.

SGSN - служить посередником між базовою станцією та основним вузлом оператора внутрішньої мережі. Він відповідає за контроль доставлення пакетів даних кожного користувача. Також, SGSN співпрацює з базою абонентів HLR, де отримує інформацію про абонентів і перевіряє їх, щоб контролювати доступ користувачів. З іншого боку, він перетворює кадри GSM у формати, які

підтримують протоколи TCP/IP, що дозволяє надалі використовувати та передавати дані через Інтернет. Основною складовою є шифрування даних за допомогою різних алгоритмів та контроль при завантаженні їх в мережу базової станції.

Вузол комутації GGSN, який включає модуль SGSN з Інтернету. Він створює локальну мережу оператора разом із SGSN із відповідними локальними ідентифікаторами пакетів.

Цей модуль відповідає даним адреси, динамічній IP, відстеженню інформації про зовнішній доменний простір мережі та інформацію про власних абонентів, включаючи дані про тарифні плани користувачів. Крім того, GGSN зберігає маршрути та адреси в базах даних. Ці функції можуть розширити функціональність технології GPRS. Збільшення кількості комутаторів SGSN також може досягти цього. Якщо в одній базовій станції є більше таких комутаторів, вона може забезпечити більшу пропускну здатність.

#### 1.4 Особливості роботи MQTT протоколу

MQTT — це протокол повідомлень, який слідує за шаблоном Publisher/Subscriber і використовує топологію M2M (Machine to Machine). Він широко використовується в Інтернеті речей і базується на стеці TCP / IP [12, 13].

У випадку MQTT, кожен зв'язок залишається відкритим і використовується повторно у кожному необхідному спілкуванні. Щось інше, ніж те, що відбувається в інших відомих протоколах, кожна комунікація вимагає нового зв'язку.

Саме слово Publisher дослівно перекладається, як видавець, тобто це пристрій, який видає інформацію. А Subscriber означає підписник, це пристрій, який отримує інформацію тільки тих «тем» на які він підписаний. Тому він належить до одного з основних шаблонів обміну повідомленнями.

Протокол MQTT використовує фільтр, щоб організувати повідомлення, надіслані кожному клієнту, на основі тим, які організовані ієрархічно. Таким чином, клієнт може опублікувати повідомлення, які стосуються конкретних

параметрів. Після цього, брокер надсилає повідомлення всім клієнтам або підключеним пристроям, які підписалися на тему.

Якщо зв'язки встановлені через TCP/ IP, сервер або брокер вестиме облік підключених клієнтів. За замовчуванням пристрої використовуватимуть порти зв'язку номер 1883, або портом 8883, якщо для додаткової безпеки використовується SSL / TLS.

Для стабільного з'єднання, потрібні не лише клієнти, сервери та порти, але й ряд наступних факторів:

- встановлення зв'язку: зв'язати повідомлення / пакет, надіслані клієнтом, з усією необхідною інформацією. Ця інформація включає ідентифікатор клієнта, ім'я користувача, пароль тощо. Брокер або сервер відповідає пакетом CONNACK, який інформує клієнта про те, що з'єднання прийнято чи відхилено;

- підтримка зв'язку: клієнти можуть відправити з сервера пакет PINGREQ, який буде збігатися з пакетом PINGRESP, щоб гарантувати, що з'єднання залишається відкритим;

- заголовок, також відомий як зафіксований заголовок, — це нерухома частина розміром від двох до п'яти байтів. Ви можете знайти в ньому контрольний код, тип відправленого повідомлення та його довжину. Кодування довжини включає від 1 до 4 байтів, використовуючи перші сім бітів кожного октету як дату про довжину, а також додатковий біт безперервності, щоб застосувати, що довжина повідомлення перевищує один байт;

- вміст або дані: пакетні дані - це те, що насправді містить повідомлення, яке потрібно надіслати. Це може бути від декількох кБ до обмеження 256 МБ.

Структура мережі MQTT доволі проста. Кожен з пристроїв, що підключається до неї вибирає актуальну йому тему повідомлень, яку потрібно отримувати надалі. Проте для роботи мережі використовується брокер, тобто сервер, який займається опрацюванням усіх повідомлень. Спрощену схему топології мережі з використанням протоколу MQTT відображено на рисунку 1.6 [112, 13].

Застосування фільтра для повідомлень в протоколі MQTT, які відправляються усім клієнтам на основі основних тем, чи пов'язаної ієрархії.

Очікування повідомлень дозволяє запобігти втраті інформації поки клієнт не отримає кожне повідомлення.

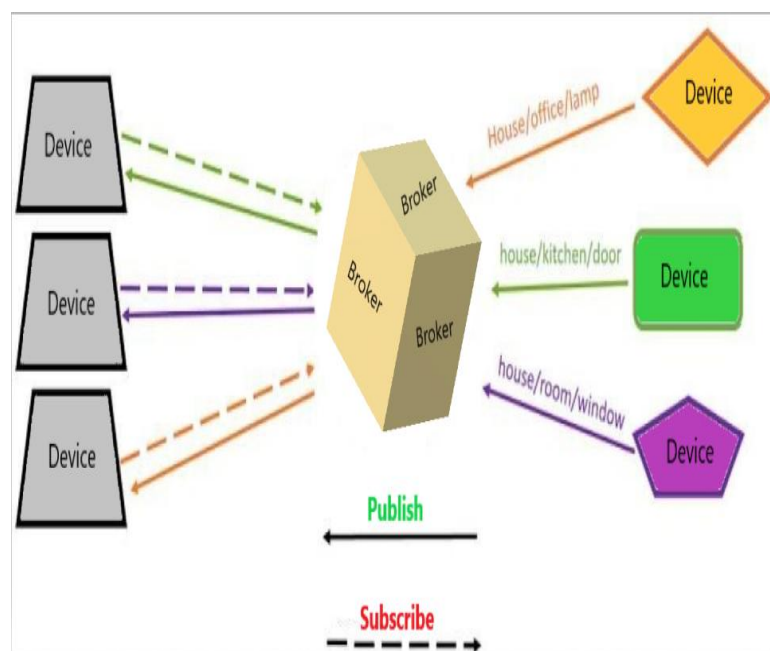


Рисунок 1.6 — Спрощена схема топології мережі протоколу MQTT

Тому для підтримки зв'язку один або декілька клієнтів можуть періодично відсилати пакет PINGREQ який буде підтримувати з'єднання. Кожний із пакетів має відповідний заголовок в шістнадцятковому форматі. Детальніше ознайомлення із типами даних та їх аналог у шістнадцятковій системі відображено у таблиці 1.2.

Також варто зазначити важливу деталь повідомлень в протоколі MQTT, таку як класифікацію QoS(Quality of Service). Вона складається з трьох основних рівні:

- QoS 0 при якому повідомлення не підтверджується. Воно надсилається лише один раз і при виникненні помилки дані втрачаються. Такий рівень якості використовується у випадках коли інформація не пріоритетна;

- QoS 1 при якому повідомлення буде доставлятися стільки разів, скільки це може знадобитися, щоб гарантувати доставлення інформації. Основним недоліком є те, що клієнт може отримувати продубльовано декілька повідомлень одного типу;

- QoS 2 при якому повідомлення обов'язково доставляється подібно до QoS1, проте посилення відбувається лише один раз. Цей рівень застосовується



системами з більшою критичністю, де потрібна велика надійність.

Таблиця 1.2 - Типи повідомлень та їх відповідне значення

Тип повідомлення	Код
CONNECT	0x10
CONNAC	0x20
PUBLISH	0x30
PACKET	0x40
PUBREC	0x50
PUBLIC	0x60
PUBCOMP	0x70
SUBSCRIBE	0x80
SUBAK	0x90
NOTSHOW	0xA0
RELEASE	0xB0
PINGREQ	0xC0
PINGRESP	0xD0
OPENNING	0xE0

У протоколі даних MQTT, кожен з'єднання залишається відкритим та використовується повторно, тобто кожна комунікація вимагає нового зв'язку. Тому послідовність дій наступна, спочатку використовуються чотири біти, які відповідають за ідентифікацію. Наступним параметром є інформація про QoS, яку забезпечує двох бітний блок. Після цього всі 16 біт присвоєно назві теми повідомлення. Логіка даної технології відображена на рисунку 1.7.

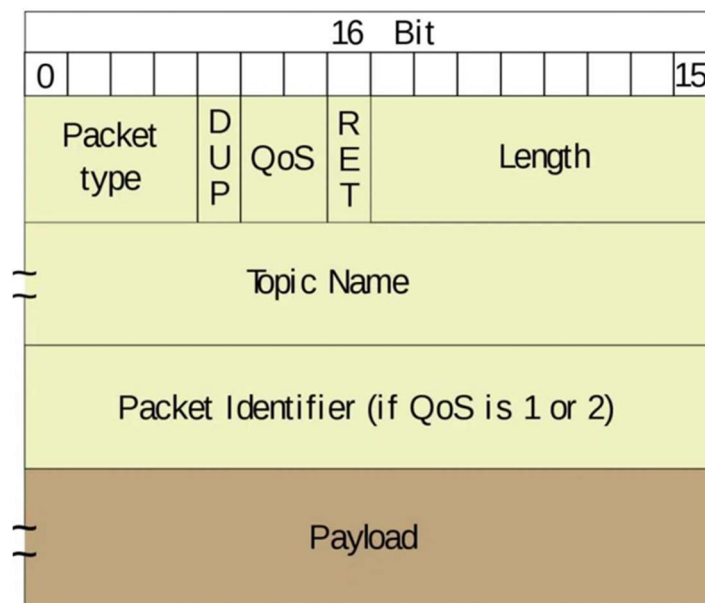


Рисунок 1.7 — Логіка протоколу MQTT



## 1.5 Постановка завдань дослідження

Проведений аналіз наявних систем збору та передавання даних з метеостанції показує, що ринок в цьому напрямку надає певні пропозиції, проте вони не повністю покривають поставлені вимоги або мають досить високу вартість. При постановці завдання враховувалися багато вимог, що забезпечують принцип роботи комп'ютерно-інтегрованої системи. Ось деякі особливо важливі з них:

- здійснювати збір актуальних даних;
- підтримувати на заданому рівні фіксацію параметрів (вологість, кислотність);
- підтримувати в режимі онлайн моніторинг параметрів.

В результаті представлених вимог визначено функції проєктованої комп'ютерно-інтегрованої системи:

- вимірювання і контроль визначених параметрів;
- передавання вимірних значень на сервер;
- реєстрація значень в системі верхнього рівня.
- візуалізація та аналітика отриманих показників.

## 2. ВИЗНАЧЕННЯ КОНТРОЛЬОВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВИБІР ТИПІВ ОБЛАДНАННЯ

### 2.1. Властивості ґрунту та методи їх аналізу

Для того, щоб отримати якісні показники, такі як кислотність ґрунту (рН) і запаси вологи в ґрунті (ЗВ) застосовують різні типи датчиків, сенсорів та логіку їх опрацювання [9, 14]. Інколи деякі із них мають похибку вимірювання. Вона може залежати, як від зовнішніх факторів, так і внутрішньої будови задіяного пристрою. До прикладу сенсори із технологією MEMS, використовуються для вимірювання механічних та фізичних величин. Це надає можливість поєднати в собі механічну та електричну складові. Сам процес безпосередньо залежить від збору та перетворення даних. Еталоне значення яких полягає в застосуванні різних фізичних або хімічних факторів.

Зміни клімату на глобальному рівні безпосередньо здійснюють негативний вплив на сільське господарство, а саме на вирощування рослинницької продукції [15-20]. Дефіцит вологи, так само як і перезволожений ґрунт погіршує умови вирощування культур на різних стадіях розвитку. Розуміння основних концепцій ґрунтової води, доступних датчиків вологості ґрунту, сенсорної технології та процедур їх встановлення, надає можливість інтерпретувати отримані значення. Наприклад, щоб визначити ступінь забезпеченості рослин вологою, варто визначити запаси продуктивної вологи, а не лише фактичного вмісту.

На запаси продуктивної вологи впливають різні фактори, такі як: кліматичні умови, типи ґрунтів, рельєф, сівозміна та технологія обробітку [15-29]. Для того, щоб оптимально використати цю вологу сільськогосподарські практики часто використовують методи консервації вологи, поливу й іригації, а також враховують їх при плануванні сільськогосподарських робіт.

У таблиці 2.1 можна переглянути інтерпретовані значення, відповідно до шкали оцінки запасів продуктивної вологи ґрунту.

Таблиця 2.1 - Шкала оцінки запасів продуктивної вологи ґрунті

Вміст вологи, мм		Оцінка ЗПВ
Від 0 -30см		
>40		Добра
40-20		Задовільна
<20		Низька
Від 0 -100см		
>160		Дуже добра
160-130		Добра
130-90		Задовільна
90-60		Низька
<60		Дуже низька

Моніторинг вологості ґрунту поділяється на дві великі категорії – прямий і непрямий моніторинг [21]. Прямими методами вимірюють об'ємну вологість ґрунту. Ці методи є руйнівними, виснажливими, трудомісткими та нетривалими.

Методи непрямого моніторингу вологості ґрунту вимірюють об'ємний вміст води, використовуючи відповідні властивості на основі рівняння калібрування. Різні фактори, такі як фізичні та хімічні властивості ґрунту, температура ґрунту та точність рівняння заводського калібрування, можуть впливати на продуктивність непрямих датчиків. Залежно від технології датчика (наприклад, часу відгуку датчика, об'єму датчика, робочого діапазону тощо), різні пристрої моніторингу вологості ґрунту реагують по-різному в різних середовищах ґрунту.

Нижче наведено короткий опис кожного методу моніторингу вологості ґрунту та принципів роботи датчиків, щоб визначити які прилади найкраще підходять для певних виробничих умов і операцій [21].

Метод фізичного стану включає в себе збір зразків ґрунту в різних місцях і на різних глибинах у полі для перегляду та обмацування ґрунту, подрібнюючи зразок на дрібні шматочки, а потім стискаючи його вручну, щоб утворити кульку.

Потім ґрунт намотується стрічкою між великим і вказівним пальцями. Тому даний метод потребує значного судження та досвіду, щоб правильно оцінити вміст води у ґрунті. Загалом це найменш точний метод, оскільки він дає суб'єктивну оцінку вологості ґрунту. Однак, метод широко використовується. Цей метод є дешевим, оскільки вимагає лише ручного зонда ґрунту або шнека для вилучення зразка ґрунту з різних глибин. Враховуючи просторову мінливість ґрунту в полі, цей метод можна використовувати для управління зрошенням, особливо якщо вимірювання періодично звіряються з більш точним методом. Цей метод стає більш складним під час роботи з шаруватим ґрунтом (різна текстура ґрунту на різних глибинах) через різницю у фізичних властивостях ґрунту між шарами. Іншим недоліком цього методу є необхідний досвід, щоб отримати впевненість і досягти точності.

Гравіметричний метод забезпечує пряме вимірювання вологості ґрунту й не потребує датчиків. Він передбачає збір зразків ґрунту в різних місцях і на різних глибинах за допомогою ґрунтового зонда або ґрунтового бура. Потім ґрунт закривають у герметичному контейнері або поліетиленовому пакеті, щоб уникнути втрати вологи перед зважуванням (якщо берете кілька зразків ґрунту в полі, помістіть зразок ґрунту в герметичний контейнер або пластиковий пакет і зберігайте в герметичній скрині для льоду). Після визначення вологої ваги ґрунт поміщають у духовку на 24 години при 220 °F, а зразок сухого ґрунту повторно зважують, щоб визначити кількість втраченої води. Цей метод також вимагає використання об'ємної щільності ґрунту для перетворення гравіметричного вмісту води в об'ємний вміст води. Наприклад, якщо вологий зразок ґрунту важить ( $M_{ws}$ ) 120 грамів до того, як його висушать, а суха вага ( $M_{ds}$ ) після 24 годин сушіння при 220 ° F становить 100 грамів, а насипна щільність ( $\rho_b$ ) становить 1,25 грам/см<sup>3</sup> масовий і об'ємний вміст води можна розрахувати за допомогою рівнянь:

Хоча цей метод досить простий, він також точний і є стандартним методом вимірювання вмісту вологи в ґрунті, тобто його часто використовують для перевірки або калібрування інших методів. Цей метод може дати точну міру об'ємного вмісту води в межах 1 відсотка, якщо відома насипна щільність і для

зважування використовуються надійні ваги. Однак через високу трудомісткість і трудомісткість виробники не використовують цей метод на регулярній основі. Іншим обмеженням є те, що вимірювання не є миттєвими, оскільки для повного висихання ґрунту потрібно 24 години .

Тензіометричний метод вимірює матричний потенціал ґрунту, який також називають всмоктуванням ґрунтової води або напругою ґрунтової води (негативний тиск). Тензіометри в основному використовуються в садових культурах і складаються з герметичної, заповненої водою циліндричної трубки з пористою чашкою, прикріпленою на нижньому кінці, і вакуумметром у верхній частині.

Напруга, виміряна тензіометром, еквівалентна силі або енергії, яку має подолати рослина, щоб отримати воду з ґрунту, і силі, яка визначає розподіл і транспорт вологи в ґрунті. Пористий стакан повинен добре контактувати з ґрунтом на потрібній глибині. Якщо встановити таким чином, вода в пористій чашці утворюватиме рівновагу з водою в ґрунті, і вода буде втягуватися в пористу чашку або витягуватися з неї, коли ґрунт стає вологішим або сухішим. Цей процес створює та вивільняє силу всмоктування в чашці. Сила передається через водяний стовп всередині пластикової трубки та викликає показання напруги на вакуумметрі (записується вручну або автоматично за допомогою датчика тиску, підключеного до реєстратора даних). Загалом, тензіометри не вимагають калібрування залежно від ґрунту та добре працюють зі змінами температури та солоності ґрунту.

Розсіяння нейтронів - цей метод вважається найбільш точним непрямим методом контролю вологості ґрунту. Нейтронні зонди складаються з джерела нейтронів, детектора та електронної лічильної ваги, які з'єднані між собою електричним кабелем. Вимірювання на бажаних глибинах виконуються шляхом опускання зонда вниз по доступній трубці, встановленій вертикально в ґрунті. Нейтрони високої енергії випромінюються радіоактивним джерелом (Америцій 241/Берилій) у всіх напрямках у ґрунт, де вони стикаються з атомами водню води (тобто  $H_2O$ ) у ґрунті. Через повторювані зіткнення швидкість нейтрона

зменшується або сповільнюється. Таким чином, швидкість ослаблення залежить від кількості присутньої води.

Детектор поблизу джерела підраховує кількість нейтронів, що повільно рухаються, протягом періоду від 15 секунд до 2 хвилин. Ці необроблені підрахунки потім передаються в мікропроцесор і перетворюються за допомогою калібрувального рівняння (наданого виробником або розробленого польовим калібруванням) у значення об'ємного вмісту води.

Нейтронметри зазвичай не використовуються для управління зрошенням на фермах через їх радіоактивне джерело; однак, завдяки своїй точності, цей метод зазвичай використовується для дослідницьких завдань і для калібрування інших датчиків вологості ґрунту. Важливо звести радіаційний вплив до мінімуму та уникати фізичного пошкодження інструменту. Нейтронний метод визначення вологи. Джерело нейтронів вставляється в ґрунт для перевірки через зондову трубку, і швидкі нейтрони, які він постійно випромінює, стикаються з різними елементами в ґрунті та втрачають енергію, тим самим сповільнюючи його. Серед них, коли швидкі нейтрони стикаються з атомами водню, вони втрачають найбільше енергії і легше сповільнюються. Отже, чим вищий вміст води в ґрунті, тобто чим більше атомів водню, тим більша щільність хмари повільних нейтронів.

Вимірюючи кореляцію між щільністю хмари повільних нейтронів і вологістю ґрунту, можна визначити вміст вологи в ґрунті, а похибка вимірювання становить близько  $\pm 1\%$ . Метод нейтронного приладу дозволяє періодично і багаторазово проводити вимірювання на різних глибинах у вихідному положенні, але вертикальна роздільна здатність приладу низька, а вимірювання на поверхні викликає значні похибки через легке розсіювання швидких нейтронів у повітрі. Тому розробляється особливий тип нейтронного приладу, або використовують екранування, або використовують інші методи калібрування.

Типова інсталяція включає встановлення доступних трубок шляхом розміщення їх у щільно прилягаючих отворах, попередньо просвердлених трубкою для ґрунту або шнеком, які керуються вручну або машиною (зонд

Giddings; Gidding Machine Company, Віндзор, Колорадо). Ідеальні трубки мають мінімальну товщину стінок, достатню для того, щоб зонд міг поміститися в них без повітряного зазору, і виготовлені з матеріалу, який нейтралізує нейтрони. Інші фактори для вибору матеріалу трубки доступу включають вартість, довговічність і доступність. Загалом, алюміній є найкращим вибором матеріалу, хоча латунь, сталь і нержавіюча сталь також успішно використовуються. Важливо не встановлювати трубку доступу в отвір великого розміру, оскільки це може створити порожнечі та повітряні зазори поруч із трубкою доступу. Також важливо накрити трубку доступу зверху (використовуючи перевернуту банку), щоб уникнути накопичення води всередині трубки доступу.

До найбільш поширених аналізів належить визначення кислотності ґрунту [16-19]. Зважаючи на те, що кислотність є основою хімічної діяльності ґрунту, вона в першу чергу впливає на активність елементів живлення в ґрунті та їхнє засвоєння рослинами. оскільки рН впливає на всю біоту ґрунту, включаючи гриби, водорості та мікроорганізми. Реакція середовища (рН) є показником кислотності або лужності ґрунту і залежить від вмісту іонів водню ( $H^+$ ). Цей показник в основному залежить від іонного обміну з мінеральними та органічними колоїдами, а також від присутності катіонів, таких як карбонати кальцію, натрію та калію, серед інших.

Навіть сьогодні, на початку 21 століття, є фермери, які не цікавляться кислотністю ґрунтів на власних полях, в результаті чого можуть отримати недобір урожайності, за рахунок не якісно підібраних і розподілених по полю азотних чи мінеральних добрив. Значна частина сільськогосподарських культур люблять ґрунти з нейтральним рН. Але є й такі, які ростуть на кислих або слабокислих ґрунтах. Це рослини, які мають особливу потребу в марганці та залізі. Щавель, наприклад, любить кислі ґрунти. На таких ґрунтах можна вирощувати різні овочі, такі як гарбуз, шпинат, огірки, томати, редька, салат і кабачки. Спаржа, селера, буряк, морква, капуста та цибуля люблять нейтральний ґрунт. Крім того, лужні місця ідеально підходять для вирощування жита та вівса.

Реакція середовища ґрунту варіюється від 5,0 (сильно кисла) – 7,0 (нейтральна) – до 9,0 (сильно лужна). З підвищенням рН збільшується

ймовірність утворення нерозчинних гідроксидів і карбонатів. На рисунку 2.1. відображено візуальну класифікацію кислотності ґрунту.

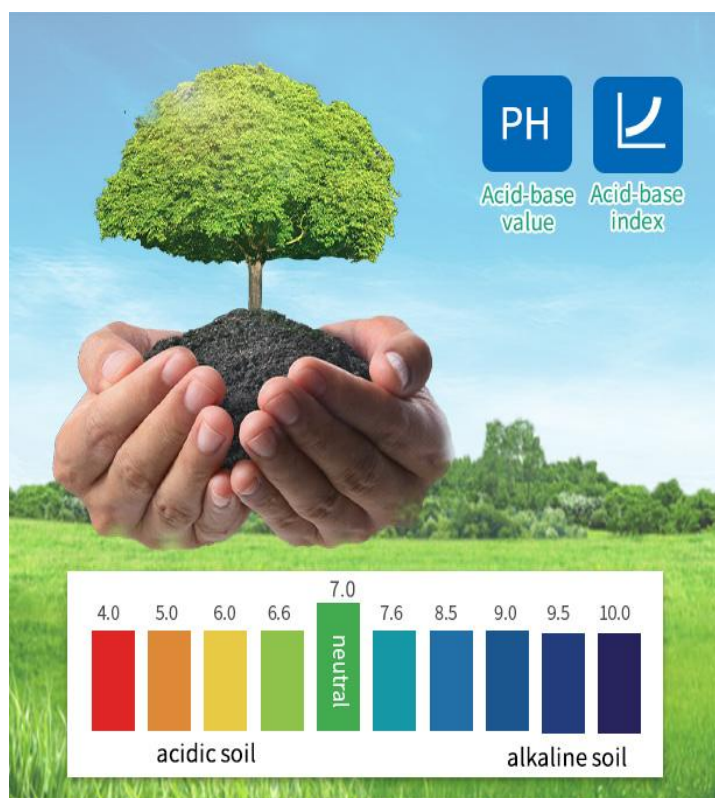


Рисунок 2.1 — Градація кислотності ґрунту

В таблиці 2.2 наведено оптимальні значення рН ґрунту для основних сільськогосподарських культур.

Таблиця 2.2 - Оптимальні значення кислотності ґрунту

Культура	рН	Культура	рН
Пшениця озима	6.3-7.6	Картопля	5.0-5.5
Соняшник	6.0-6.8	Цукровий буряк	7.0-7.5
Горох	6.0-7.0	Люцерна	7.0-8.0
Соя	6.5-7.1	Конюшина	6.0-7.0
Ячмінь	6.8-7.5	Капуста	6.7-7.4
Кукурудза	6.0-7.0	Столовий буряк	6.8-7.5
Овес	5.0-7.7	Томати	6.3-6.7
Гречка	4.7-7.5	Редиска	5.5
Морква	5.5-7.0		
Огірок	6.0-7.9		



## 2.2 Типи обладнання для вимірювання вологості та кислотності ґрунту

В даний час для вимірювання вологості ґрунту використовуються датчики FDR (тип у частотній області) і TDR (тип у часовій області). До яких відносяться наступні датчики: тензометричні, ємнісні, діелектричні, гіпсові блоки, об'ємні та нейтронні зонди [30, 31]. Ці датчики вимірюють натяг ґрунту при розміщенні в землю, або об'ємний вміст води. Кожен із цих датчиків має бути відкаліброваним, оскільки під час калібрування датчик піддається впливу зовнішніх факторів та проникнення в ґрунт із еталонним значенням, це дає можливість провести налаштування таким чином, щоб різниця між попередньо визначеним вмістом вологи і датчиком продуктивності була зведена до мінімуму.

За допомогою TDR вологість ґрунту вимірюється шляхом оцінки часу проходження імпульсу крокової напруги зі швидким наростанням, що поширюється вздовж лінії електропередачі, побудованої за допомогою коаксіального кабелю та зонда [32, 33]. Він складається з двох або трьох паралельних стрижнів, вставлених у ґрунт, які виконують роль хвилеводів. Електромагнітна хвиля пропускається через ґрунт через стрижні від лінії електропередачі. Подібно до методу FDR, швидкість і сила хвилі після її проходження від одного стержня до іншого безпосередньо пов'язані з діелектричними властивостями ґрунту, а отже, його вологістю. Зі збільшенням діелектричної проникності ґрунту час подорожі зменшується, і вміст вологи у ґрунті можна оцінити за допомогою калібрувального рівняння.

Загалом, прилади TDR вимагають пристрою, здатного генерувати серію синхронізованих електричних імпульсів із широким діапазоном високих частот. Ця висока частота забезпечує реакцію діелектричної проникності, яка менш залежить від специфічних властивостей ґрунту, таких як текстура, солоність або температура, порівняно з іншими методами (Evelt and Heng, 2008). Датчики TDR можна встановити вертикально, горизонтально або діагонально, оскільки вони забезпечують середній вміст вологи в ґрунті по всій довжині зонда. У минулому висока вартість датчиків TDR перешкоджала їх використанню для оцінки вмісту

вологи в ґрунті для зрошення; однак завдяки останнім досягненням у технології та зниженню вартості ці датчики тепер часто використовуються для цілей зрошення. Кожен із них має всю необхідну електроніку, вбудовану в голівку датчика, щоб генерувати імпульс напруги та передавати оброблені дані до реєстратора даних

Ємнісні датчики вологості ґрунту характеризуються високою точністю, широким діапазоном, різноманітністю вимірюваних матеріалів і швидкою швидкістю передачі, що дає можливість застосування для онлайн-моніторингу [30-36].

Використання діелектричних властивостей ґрунту для вимірювання вологості є ефективним, швидким, простим і надійним методом. Для ємнісного датчика вологості ґрунту з певною геометричною структурою його ємність пропорційна діелектричній проникності вимірюваного матеріалу між двома полюсами. Вигляд структури ємнісного датчика відображено на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 — Діелектричний датчик

Діелектрична проникність води набагато більша, ніж у звичайних матеріалів, коли вологість ґрунту збільшується, її діелектрична проникність відповідно збільшується, а також збільшується значення ємності, яке видає датчик вологості під час вимірювання. Відповідне співвідношення між ємністю датчика та вологістю ґрунту може вимірювати вологість ґрунту.

Нейтронний метод визначення вологи. Джерело нейтронів вставляється в ґрунт для перевірки через зондову трубку, і швидкі нейтрони, які він постійно випромінює, стикаються з різними елементами в ґрунті та втрачають енергію, тим самим сповільнюючи його. Серед них, коли швидкі нейтрони стикаються з атомами водню, вони втрачають найбільше енергії і легше сповільнюються. Отже, чим вищий вміст води в ґрунті, тобто чим більше атомів водню, тим більша щільність хмари повільних нейтронів.

Тензіометричний датчик вологості ґрунту є різновидом датчика, який широко та успішно використовується в деяких вимірюваннях вологості ґрунту. Цей інструмент має пористу порцелянову головку, яка з'єднана з вакуумметром через заповнену водою трубу, як показано на рисунку 2.3. Пристрій вставляється в свердловину в ґрунті. Головка з порцеляни щільно прикріплена до ґрунту, а вакуумметр встановлений на землі. Існує великий розвиток у використанні тензіометра для вимірювання вологості ґрунту.



Рисунок 2.2 – Тензіометричний датчик

Його переваги: структура та принцип відносно прості, їх можна вимірювати в режимі онлайн у режимі реального часу, а також можна визначити напрямок потоку та глибину проникнення води в ґрунт, але його недоліки також дуже помітні. Його діапазон вимірювання значною мірою залежить від якості ґрунту. Для глини, завдяки її хорошій повітропроникності, навіть коли

негативний тиск вологи в ґрунті нижче 0-8Па, вміст вологи в ґрунті можна виміряти тензіометром. Цей метод вимірює всмоктування ґрунтової води, яку необхідно перетворити на вміст води у ґрунті відповідно до кривої характеристики ґрунт-вода. Тому що зв'язок між ґрунтовою водою та енергією дуже складний, нелінійний і залежить від багатьох фізичних і хімічних властивостей ґрунту.

Тензіометричний метод є різновидом датчика, який використовується при вимірюванні вологості ґрунту. Цей інструмент має пористу порцелянову головку, яка з'єднана з вакуумметром через заповнену водою трубу. Пристрій вставляється в свердловину в ґрунті. Герметичний датчик на основі мікросхеми DS18B20 можна під'єднати двома способами:

За трьома дротами: живлення (червоний), земля (чорний) та сигнал (білий).

За двома дротами: земля та сигнал. У цьому разі датчик зрідка може давати помилкові показання, які легко виключити з кінцевого результату фільтрацією.

Незалежно від способу під'єднання, сигнальний дріт необхідно з'єднати з живленням через резистор 4,7 кОм. У разі під'єднання тільки одного датчика, підійде і резистор на 10 кОм.

Рефлектометр у часовій області належить до методу розрахунку вмісту вологи в ґрунті шляхом вимірювання діелектричної проникності ґрунту, який скорочено називається методом TDR. Оскільки діелектрична проникність води в ґрунті набагато більша, ніж діелектрична проникність твердих частинок і повітря в ґрунті, то зі збільшенням вологості ґрунту значення діелектричної проникності зростає, а швидкість поширення електромагнітних хвиль у середовищі пропорційна до діелектричної проникності. Квадратний корінь обернено пропорційний, тому час поширення електромагнітної хвилі вздовж стрижня хвилеводу також подовжується. Вимірюючи швидкість поширення високочастотних електромагнітних імпульсів у ґрунті вздовж стрижня хвилеводу, можна визначити вологість ґрунту.

Оболонка багат шарового трубчастого датчика ґрунту Renke виготовлена з ПВХ пластикової труби, яка стійка до окислення, корозії та має більший термін служби; всередині випромінює високочастотну хвилю виявлення майже 1 ГГц,

яка може проникати через пластикову трубу та ефективно відчувати ґрунтове середовище. Електрод датчика не має прямого контакту з ґрунтом і йому не заважає потужність іонів солі в ґрунті. Сільськогосподарські дії, такі як добрива, пестициди та зрошення, не впливатимуть на результати вимірювань. Вимірювання даних дуже точне; пристрій має вбудований акумулятор, який можна використовувати до одного тижня. Щоб запобігти т Він має широкий спектр сценаріїв застосування та може відстежувати інформацію про вологість ґрунту та посуху в місцях, де моніторинг погоди, вологості, умов сільського господарства та водозбереження в режимі реального часу вимагає відведення води.

Насправді не тільки вологість ґрунту має більший вплив на ґрунт, але й вплив на ґрунт таких факторів, як температура ґрунту, електропровідність ґрунту та рН ґрунту. Багатошаровий трубчастий вимірювач ґрунту — це інтегрований вологомір, який може одночасно контролювати температуру, вологість, електропровідність і рН ґрунту, а також може більш зручно та повно розуміти інформацію про ґрунт при тривалій роботі поза приміщенням без живлення від акумулятора.

Метод датчика вологості ґрунту в частотній області скорочено називається FDR. Він використовує принцип електромагнітного імпульсу для вимірювання видимої діелектричної проникності ( $\epsilon$ ) ґрунту відповідно до частоти поширення електромагнітних хвиль у середовищі для отримання об'ємного вмісту води в ґрунті ( $\theta_v$ ). Після калібрування ґрунту точність вимірювання висока, форма зонда не обмежена, і можна вимірювати кілька глибин одночасно, що полегшує отримання даних.

### 2.3 Обґрунтування компонентів проєктованої системи

Базові станції моніторингу кліматичних умов зазвичай мають великі розміри та високі витрати на встановлення та технічне обслуговування, що своєю чергою обмежує їх потенціал у розміщенні. Для отримання точних результатів вимірювань, потрібні трудомісткі процедури в автономному режимі. Тому, дані

про погодні умови та стан ґрунту не можуть бути надані в режимі реального часу. Однак пріоритетним є отримання інформаційних даних про стан ґрунту, як з високою просторовою, так і з часовою роздільною здатністю, як у просторових, так і в часових вимірах. Це можна реалізувати завдяки швидкому розвитку технології Інтернету речей (IoT) стан ґрунту можна вимірювати, а зібрані дані передавати на сервери через бездротові мережі, наприклад, сенсорні мережі (WSN). Використовувалися різні портативні датчики вологості ґрунту з прийнятною ціною. Одними із основних джерел вологості є опади та структура ґрунту. Таким чином, датчик TDR є хорошим вибором для надання надійних даних вимірювання.

Без складного процесу датчик може виміряти вміст вологи в ґрунті за лічені секунди. Хоча точність цих датчиків може бути не такою хорошою, як стаціонарні пристрої моніторингу, вона достатньо справедлива, щоб показати тенденцію зміни вологості. Потім необхідно вчасно передати та обробити інформацію із датчиків.

GPS означає глобальну систему позиціонування, і вона використовується для визначення місцезнаходження, висоти, швидкості, дати й час в UTC. Це надасть можливість підключати GPS модуль з NodeMCU. Neo 6M - це серійний GPS-модуль, який надає деталі розташування через послідовний зв'язок. Він має чотири контакти, тому модуль передає дані декількома рядками. Схема підключення модуля GPS показана на рисунку 2.4.

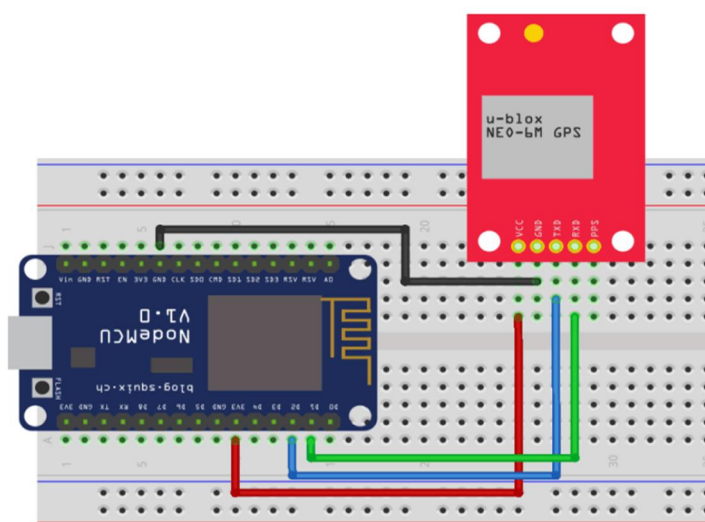


Рисунок 2.4 - Схема підключення GPS

Сонячні електричні панелі, також відомі як фотоелектричні (PV), вловлюють енергію сонця і перетворити його на електроенергію, яку можна використовувати. Сонячні фотоелектричні панелі виготовляються з фотоелектричної енергії комірок, згрупованих у модулі. Принцип роботи сонячних панелей показано на рисунку 2.5.

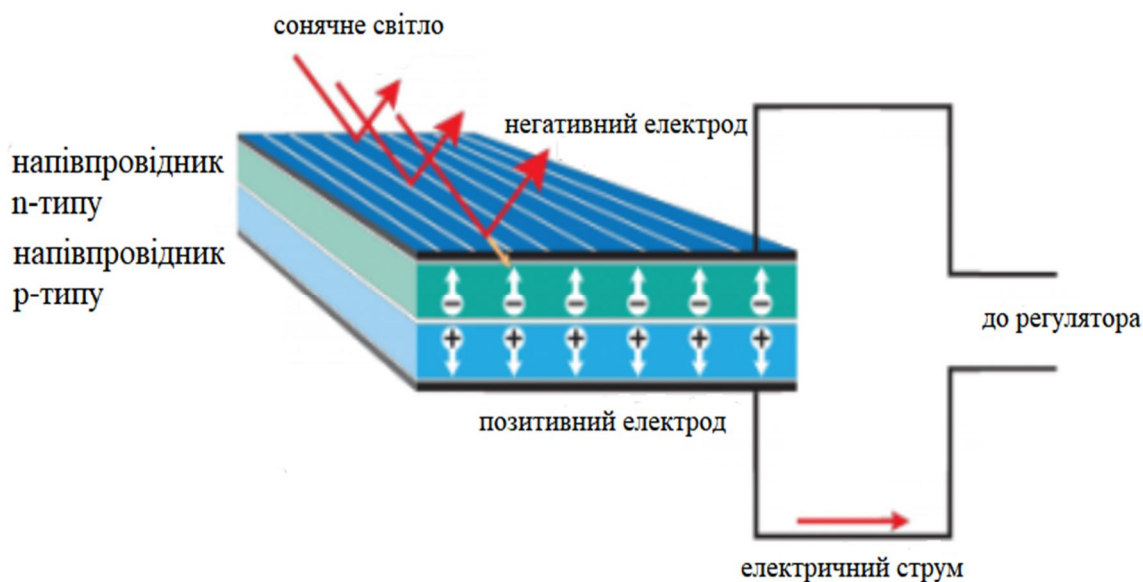


Рисунок 2.5 - Принцип роботи сонячних панелей

Більшість доступних варіантів сонячних панелей підходять до одного з трьох типів: монокристалічний, полікристалічний (також відомий як мультикристалічний) і тонкоплівковий (рисунок 2.6). Ці сонячні панелі відрізняються за способом виготовлення, зовнішнім виглядом, продуктивністю, вартістю.

Сонячні фотоелементи виготовляються з шарів напівпровідникового матеріалу, як правило, кремнію. Коли світло потрапляє на матеріал, електрони вибиваються, створюючи потік електрики. Для роботи клітинам не потрібні прямі сонячні промені, вони можуть працювати в похмурий день. Однак, чим сильніше сонячне світло, тим більше генерується електроенергії.

Для розв'язання вищевказаних проблем можна використовувати технологію низької потужності широкої зони (LPWA), нову техніку зв'язку між машинами (M2M). Він спеціально розроблений, щоб забезпечити повсюдне покриття, низьке енергоспоживання та витрати для пристроїв, які рідко



надсилають або отримують повідомлення з обмеженою швидкістю передачі даних.



Рисунок 2.6 - Види сонячних панелей

Загалом мережа LPWA може забезпечувати приміські та сільські діапазони понад 20 кілометрів (км) і типовий міський діапазон близько 5 км. Крім того, технологія LPWA також може дозволити пристроям працювати з тривалим терміном служби батареї понад десять років. Ці особливості технології LPWA особливо привабливі для типових програм розумного міста, таких як моніторинг якості повітря в містах. Завдяки інтеграції технології LPWA із системою моніторингу якості повітря вузли моніторингу якості повітря можуть бути широко розкидані по кожному куточку міських районів, щоб значно покращити просторову та часову роздільну здатність моніторингу. Крім того, зіркоподібна топологія та тривалий термін служби батареї мереж LPWA також можуть зменшити витрати на обслуговування та розгортання системи моніторингу якості повітря.

Бездротова сенсорна мережа (WSN) складається з просторово розподілених автономних пристроїв, що використовують датчики для моніторингу. Система WSN містить шлюз, який забезпечує бездротовий зв'язок підключення до дротового світу та розподілених вузлів. Бездротовий протокол залежить від вимог програми. Деякі з доступних стандартів включають 2.4ГГц радіостанції на основі IEEE 802.15.4 або фірмові радіостанції, які зазвичай становлять 900 МГц. Перший елемент (мережа датчиків) містить кілька вузлів, що об'єднують різні типи датчиків. Вузли мережі з'єднані між собою (за



допомогою протоколу ZigBee), і для отримання даних від кожного вузла та повторної передачі інформації в хмарну систему потрібен шлюз. Шлюз також повинен гарантувати прийняття пакетів від вузлів мережі та до хмарної системи. Крім того, хмарна система відповідає за отримання даних із сенсорної мережі та надання спеціальних послуг для зберігання, класифікації та запиту даних. Нарешті, останній компонент стосується програмних засобів кінцевого користувача, які надають послуги для запиту даних у хмарну систему.

Перш за все, представлені розроблені вузли, які відповідають за бездротове вимірювання та передачу даних. Ці дані отримує шлюз, який є центральним вузлом мережі. Своєю чергою, це дозволяє користувачеві керувати мережею, попередньо обробляти дані та підключатися до хмари. У другому підрозділі пояснюється архітектура мережі та робота шлюзу. Крім того, описано повний процес, який необхідний і використовується в задачах обробки даних. Нарешті, третій підрозділ описує послуги, які надає хмарна система для зберігання та класифікації даних, а також програмні засоби кінцевого користувача.

Розроблені сенсорні вузли є недорогими та малогабаритними пристроями з можливістю збору та передачі інформації щодо стану ґрунту на дослідних ділянках. Для цього до кожного окремого вузла можна під'єднати до чотирьох МОП-датчиків. Крім того, для здійснення бездротового зв'язку вузлів реалізована технологія ZigBee. Це модель, яка визначає набір протоколів зв'язку (який перебиває специфікацію IEEE.802.15.4) для недорогих бездротових мереж із низькою швидкістю передачі даних. У цій конструкції для цієї мети використовуються пристрої XBee від Maxstream.

Це радіочастотні модулі, які створюють мережі ZigBee за допомогою протоколу зв'язку IEEE 802.15.4 і працюють у діапазоні 2,4 ГГц. Вони також включають мікроконтролер, який додає невелику обчислювальну потужність і налаштування.

Сонячна панель може живити вузли для більшої автономності за допомогою контролера управління зарядом батареї. За допомогою так званих DC-DC перетворювачів 3,3В і 5В акумулятор на 2050 мАг живить радіочастотний модуль типу XBee і ґрунтові датчики. Тому датчики

підтримують свої сигнали за допомогою операційних підсилювачів і фільтрів низьких частот. Після цього сигнали передаються на модуль XBee, який керує дистанційним зв'язком. Крім того, він використовує сигнал широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), щоб регулювати потужність нагрівачів датчиків, а також вимикає датчики, коли вони не споживаються, щоб зменшити споживання енергії. Нарешті, можна під'єднати пневматичний насос і електроклапан (EV) для проведення вимірювання в лабораторних умовах. Крім того, модуль XBee керує підключенням, відключенням і живленням.

Після завершення кожного циклу вимірювання виконується етап попередньої обробки. На цьому етапі основні характеристики кожного датчика витягуються, а потім передаються в хмару. Інформація про кожен із датчиків, інтегрованих у пристрій, і відповідний ідентифікаційний номер вузла отримує хмарна система. Нарешті, коли досягнуто бажаної кількості циклів, аналіз закінчується, і переходить в режим очікування (для збереження енергії).

В іншому випадку, оскільки призначенням цього пристрою є вимірювання стану ґрунту, також був розроблений режим роботи мережі датчиків, у якому зразки періодично збираються та надсилаються до хмари даних. Вузли залишаються в розрядженому стані протягом проміжків часу між вимірюваннями.

Впровадження методів розпізнавання образів і штучного інтелекту необхідне для виконання завдань виявлення змін ґрунту. Як показано на рисунку 2.7, цей процес можна розділити на чотири етапи: виділення ознак і попередня обробка сигналу, зменшення розмірності, прогнозування та прийняття рішень.

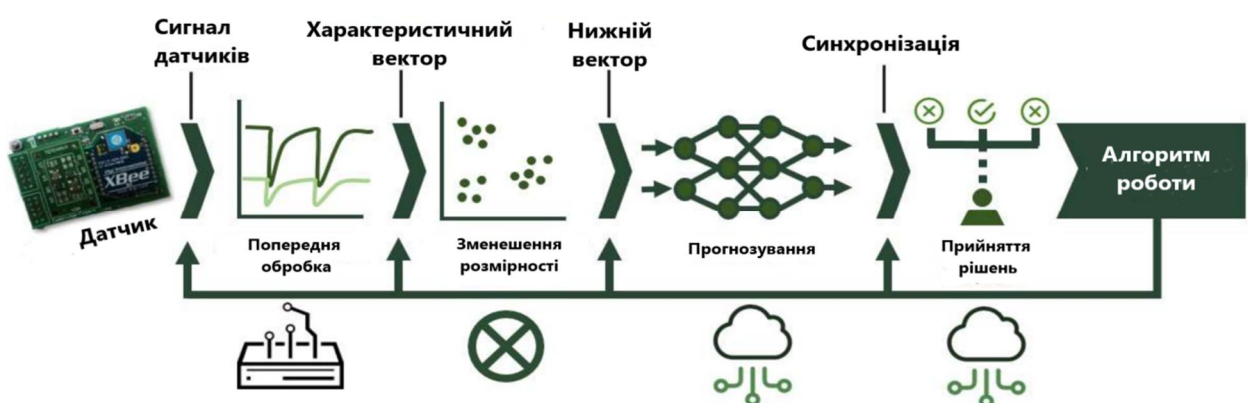


Рисунок 2.7 - Етапи виявлення змін ґрунту

Крім того, початковий блок на цьому малюнку представляє всю мультисенсорну систему, виходом якої є тимчасові вимірювання, зроблені на кількох зразках. Для цієї системи етап попередньої обробки реалізований на шлюзі, зменшення розмірності не потрібно (хоча воно включене в розділ результатів для кращої візуалізації даних), а етапи прогнозування та прийняття рішень виконуються в хмарі даних.

Перший етап — це попередня обробка сигналу, де описові параметри витягуються з тимчасової реакції датчиків. З них готується вектор характеристик для подальшої обробки. Для цього була використана методика маніпулювання базовою лінією. Це перетворює відповідь датчиків, використовуючи їх базову лінію як еталон, тобто відповідь датчиків на вологість ґрунту. У цьому випадку цей етап виконується в режимі реального часу на шлюзі за допомогою алгоритму відносного опору (RR).

На етапі зменшення розмірності вектор характеристик, отриманий на попередньому етапі, проєктується на менший розмірний простір, щоб уникнути проблем, пов'язаних із великими наборами даних. Аналіз головних компонентів (PCA) є одним із найбільш використовуваних методів на цьому етапі. PCA — потужна неконтрольована лінійна техніка розпізнавання образів. Ця фаза не була реалізована в хмарі, оскільки кількість датчиків невелика. Однак використання цієї техніки дозволяє візуалізувати структуру даних за допомогою графіків. Ось чому він використовується в результатах, представлених у цій статті, отримуючи інтерпретації, які дозволяють глибше зрозуміти, оскільки це дозволяє аналізувати декілька змінних одночасно.

Отриманий вектор низької розмірності використовується для вирішення даної проблеми прогнозування, якою зазвичай є кластеризація, регресія або класифікація. У цій роботі були використані методи регресії та класифікації. У завданнях регресії метою є прогнозування набору властивостей (концентрації) аналізу. Для цієї мети було обрано метод регресії опорного вектора (SVR), оскільки він, як правило, найбільш використовуваний і рекомендований у застосуваннях датчиків. Він полягає у використанні машини опорних векторів (SVM) у задачах регресії. Це робиться шляхом мінімізації стану помилки за

допомогою так званої «лінійної  $\epsilon$ -нечутливої функції втрат». Крім того, представлення за допомогою функцій ядра пропонує нелінійне розв'язання проблеми, проєктуючи інформацію в простір характеристик більшої розмірності, що збільшує обчислювальну потужність машин з лінійним навчанням. Стосовно класифікаційних завдань, вони стосуються проблеми ідентифікації невідомого зразка як класу в межах вивченого набору. Для цього було навчено багат шаровий алгоритм зворотного поширення. MLP — це модель нейронної мережі прямого зв'язку, що складається з кількох шарів вузлів у орієнтованому графі. Кожен шар повністю пов'язаний з наступним, і кожен вузол є нейроном із нелінійною функцією активації (крім вхідних вузлів). В іншому випадку алгоритм зворотного поширення — це правило навчання, яке складається з двох етапів. По-перше, існує етап прямого випередження, на якому зовнішня вхідна інформація на вхідних вузлах поширюється вперед для обчислення індикаторів вихідної інформації у вихідному блоці. По-друге, існує зворотна фаза, в якій зміни ваг зв'язку коригуються на основі різниці між розрахунковими і фактичними показаннями в одиницях виведення. Методи класифікації були реалізовані в хмарній системі, тоді як методи регресії були застосовані зовні для вивчення ємності системи. Очікується, що це буде реалізовано таким же чином у мережі хмарних датчиків у майбутніх роботах.

Завершальним етапом є оцінка помилок або продуктивності за допомогою методів перевірки. Метод перевірки, який використовується в цій роботі, є перехресною перевіркою, оскільки ті самі дані використовуються для перевірки системи, таким чином зменшуючи кількість вимірювань. Таким чином оптимізується ефективність оцінювання. Зокрема, перехресна перевірка з виключенням (LOOCV) стає найбільш відповідним методом у цій програмі.

#### 2.4 Розробка структурної схеми та алгоритму роботи комп'ютерно-інтегрованої системи збору та передавання інформації про стан ґрунту

На основі аналізу предметної області та типів обладнання для вимірювання вологості та кислотності ґрунту пропонується схема комп'ютерно-інтегрованої

системи (рисунок 2.8). На схемі відображено логічну структуру системи, а саме: датчики вологості та кислотності ґрунту, які підключені до плати «Arduino» для опрацювання інформації, що подається. До контролера також підключений GPS модуль, який призначений для передачі даних з дослідної ділянки на сервер за допомогою типу передачі даних GPRS та протоколу MQTT.

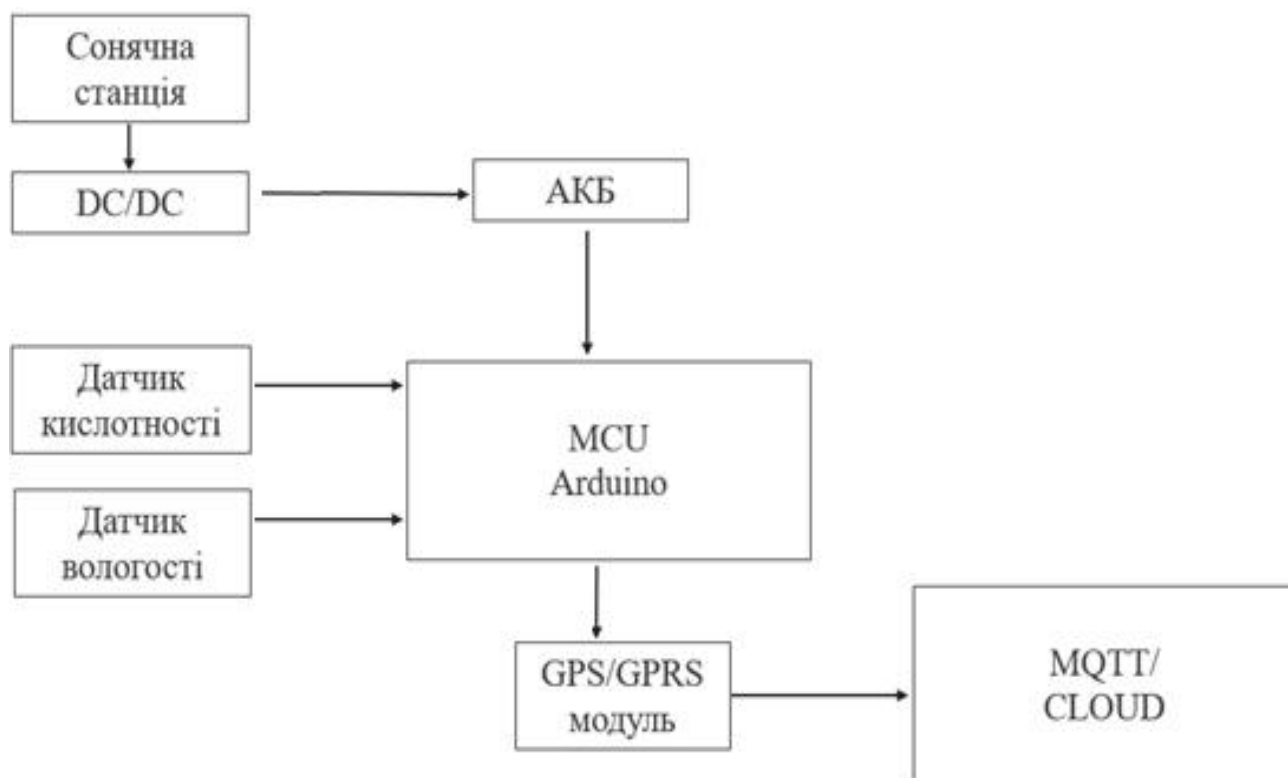


Рисунок 2.8 - Структурна схема системи збору та передавання даних

За живлення пристрою відповідає сонячна панель «SOLAR», DC/DC перетворювач та АКБ. яка підключена до модуля заряду та АКБ. Модуль перетворювача має індикацію процесу заряду, і сама відключає акумулятор при досягненні напруги на ньому 4.2В. У момент заряду світиться червоний світлодіод, а коли батарея буде повністю заряджена засвітиться зелений світлодіод, червоний при цьому згасне. Модуль заряду в свою чергу підключений до акумулятора, він потрібен, щоб вся система працювала автономною без підключення до мережі.

Етапи роботи метеостанції простий та зрозумілий, описати його можна кількома блоками (рисунок 2.9).

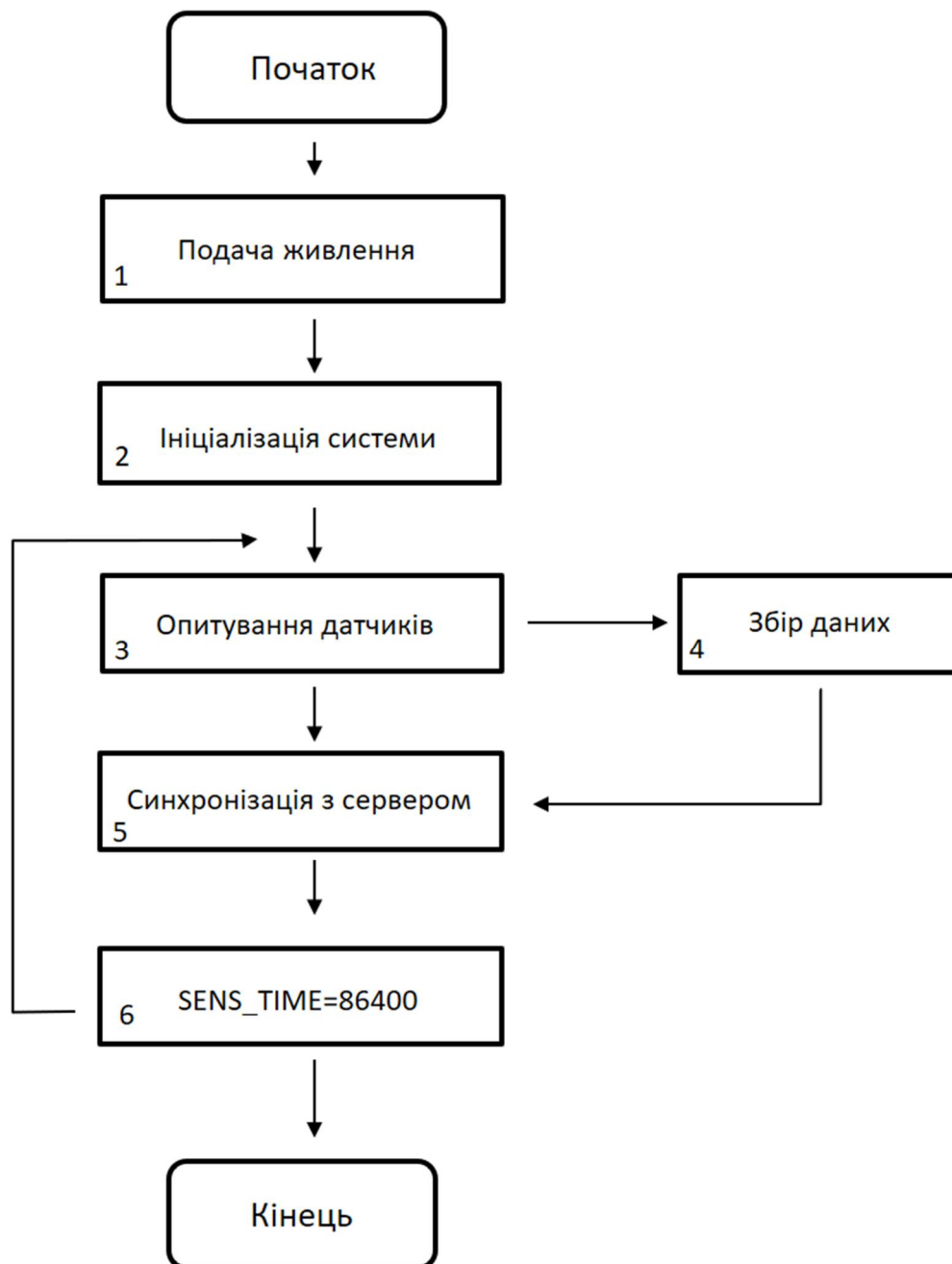


Рисунок 2.9 - Схема етапів роботи системи

- Блок 1. Подача живлення на мікроконтролер. Живлення виконується через АКБ, який заряджається від сонячної станції.
- Блок 2. В даній частині алгоритму проводиться ініціалізація складових компонентів метеостанції: підготовка до роботи, налаштування, визначення параметрів.
- Блок 3. Зчитування вимірюваних значень отриманих з датчиків. Принципи побудови метеостанції для спостереження за кореляцією стану ґрунту через Arduino

- Блок 4. Зі значень, отриманих з датчиків, накопичуються певні параметри: вологість та кислотність ґрунту.
- Блок 5. Синхронізація із хмарою. Передача даних на сервер для опрацювання алгоритмом та візуалізації
- Блок 6. Робиться зупинка на 86400 секунд, після чого знову починається з блоку №3 і так далі по колу.

### 3. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ НА МЕТЕОРОЛОГІЧНІЙ СТАНЦІЇ

#### 3.1 Вибір технічних засобів системи збору та передавання даних

##### 3.1.1 Вибір плати Arduino

Для реалізації поставленої мети проведено порівняльний аналіз існуючих плат, таких як: Arduino Nano, Arduino Uno та Arduino Mega 2560. Характеристики плат наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Характеристика плат Arduino

Параметри	Arduino Nano	Arduino Uno	Arduino Mega 2560
Цифрові Входи/Виходи	14	14	54
Аналогові входи	8	6	16
Флеш-пам'ять	16 КВ	32 КВ	256 КВ
ОЗУ	1 КВ	2 КВ	8 КВ

В результаті проведеного аналізу обрано плату Arduino Uno. Arduino Uno. Дана плата містить достатню кількість цифрових та аналогових входів, що дає змогу з'єднати всі компоненти системи, флешпам'ять і операційний блок. Оперативної пам'яті цілком достатньо для запису програмного коду. Таким чином, найкращим варіантом є Arduino Uno за технічними характеристиками та вартісними показниками.

Контролер Arduino Uno побудований на ATmega328. Роз'єм Arduino Uno показано на рисунку 3.1. Платформа містить чотирнадцять цифрових вхідних/вихідних каналів, з яких шість є цифровими та можуть бути використані як виходи широтно імпульсної модуляції (ШІМ), шість аналогових входів, кварцовий генератор 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм силового живлення, роз'єм ICSP і кнопку перезавантаження.

Arduino Uno може отримувати живлення з зовнішнього джерела або через порт USB. Вибір джерела живлення відбувається автоматично. Зовнішнє живлення може подаватися через перетворювач напруги AC/DC (блок живлення)



або акумуляторною батареєю. Роз'єм 2.1 мм з позитивним центральним полюсом підключається до перетворювача напруги.

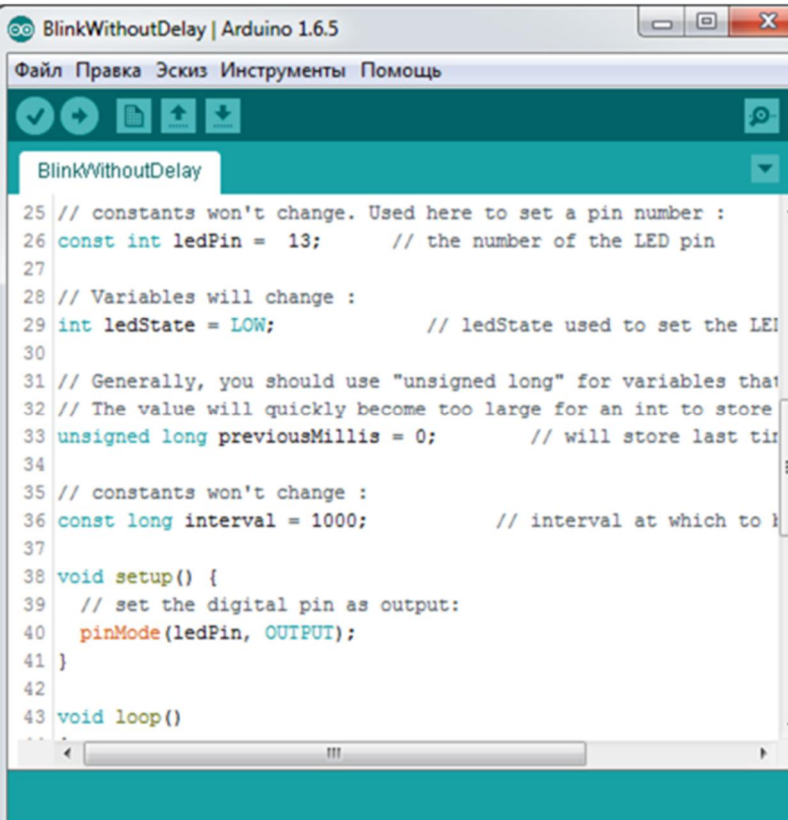


Рисунок 3.1 - Зовнішній вигляд плати Arduino Un

Провід батареї підключається до виводів роз'єму живлення Gnd і Vin. Плата підтримує зовнішнє живлення від 6 до 20 В. При напрузі живлення нижче 7В вивід 5В може видавати менше 5В, що може привести до нестабільної роботи платформи. Регулятор напруги може перегрітися та пошкодити плату, якщо він працює під напругою понад 12В. Рекомендується діапазон 7–12 В. Визначення VIN вказує на роз'єми живлення плати. Вхід використовується для подачі живлення від зовнішнього джерела. Це означає, що джерело живлення має 5 В від роз'єму USB або іншого регульованого джерела. Подача напруги живлення відбувається через вивід 5V. Регульоване джерело напруги, яке використовується для живлення мікроконтролера та компонентів на платі. Живлення може подаватися від виведення VIN через регулятор напруги або від роз'єму USB, або іншого регульованого джерела напруги 5В; 3В3. Напруга на виведенні 3.3В генерується вбудованим регулятором на платі. Максимальне споживання струму 50 мА; GND; вивід заземлення.

Arduino IDE — це інтегроване середовище для Windows, MacOS і Linux, розроблене на основі мов програмування C і C++. Його мета полягає в тому, щоб створювати та завантажувати програми на сумісні плати Arduino, а також на плати інших виробників.

Це середовище має вихідний код, який доступний за стандартною громадською ліцензією GNU версії 2. Для підтримки мов C і C++ вона використовує спеціальні угоди про структуру коду. Бібліотека програмного забезпечення проєкту Wiring, яка надає безліч загальних процедур введення та виведення, додається до основи розробки IDE Arduino. Для запуску скетчу користувачем коду потрібні лише дві основні функції та 33 основні цикли програми. Вони скомпільовані та пов'язані з програмною заглушкою main в циклічну програму, яка також є частиною набору інструментів GNU, доступного в дистрибутиві IDE. Приклад робочого інтерфейсу відображено на (рис. 3.2).



```
BlinkWithoutDelay | Arduino 1.6.5
Файл Правка Ескіз Інструменти Помощь
BlinkWithoutDelay
25 // constants won't change. Used here to set a pin number :
26 const int ledPin = 13; // the number of the LED pin
27
28 // Variables will change :
29 int ledState = LOW; // ledState used to set the LED
30
31 // Generally, you should use "unsigned long" for variables that
32 // The value will quickly become too large for an int to store
33 unsigned long previousMillis = 0; // will store last time LED was on
34
35 // constants won't change :
36 const long interval = 1000; // interval at which to blink
37
38 void setup() {
39 // set the digital pin as output:
40 pinMode(ledPin, OUTPUT);
41 }
42
43 void loop()
...
```

Рисунок 3.2 - Інтегроване середовище розробки Arduino

### 3.1.2 Вибір датчика кислотності (pH)

Датчик кислотності ґрунту RS-PH-N01-TR-1 має високу точність, швидку реакцію, стабільний вихід і підходить для різної якості ґрунту. Можна ховати в ґрунт протягом тривалого часу, стійкий до тривалого електролізу, стійкий до корозії, вакуумування, повністю водонепроникний, як показано на рисунку 3.3. Його можна широко використовувати для вимірювання pH ґрунту, точного

землеробства, лісового господарства, геологічних. До основних характеристик варто віднести наступні:

- низький поріг вартості, швидке вимірювання, реагенти не потрібні й кількість замірів необмежена;
- висока точність вимірювання (точність до  $\pm 0,3\text{pH}$ ), висока швидкість відгуку та хороша взаємозамінність;
- електрод використовує спеціально оброблені сплави, які можуть витримувати значні механічні впливи, удар і його нелегко пошкодити;
- повністю герметичний, стійкий до кислотної та лужної корозії, може заглиблюватись у ґрунт для тривалого динамічного виявлення;
- конструкція введення зонда забезпечує точне вимірювання та надійну роботу.

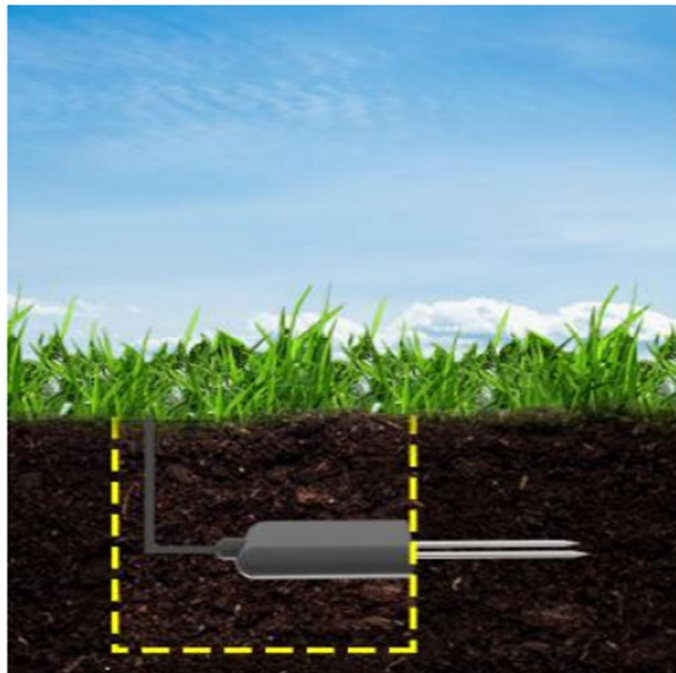


Рисунок 3.3 - Зовнішній вигляд датчика кислотності ґрунту

Датчик рН ґрунту має 4 контакти, рисунок 3.4, оскільки його потрібно під'єднати до модуля RS485 або MAX485. Чотири кольорові дроти: жовтий, синій, чорний і коричневий.



Рисунок 3.4 - Тип підключення

RS-PH-N01-TR-1 використовує протокол зв'язку Modbus. Цей пристрій працює як підлеглий з адресою пристрою, як показано в таблиці 3.2. Ми надсилаємо інструкцію або рамку запиту & Read soil PH за адресою пристрою 0x01. Отримуємо кадр відповіді таким чином, що з нього можна обчислити значення Ph. 4-й біт (починаючи з 0-го біта) – це значення Ph. Наприклад, ми отримали 0047H (шістнадцяткове) = 71 Decimal => pH = 7,1pH.

Таблиця 3.2 - Протокол зв'язку та реєстраційна адреса

Address code	Function code	Register start address	Register length	Low check bit	Check code high
0X01	0X03	0X00 0X00	0X00 0X01	0X84	0X0A

Address code	Function code	Number of valid bytes	Data area	Low check bit	High Check bit
0X01	0X03	0X02	0x00 0x47	0XD8	0x15

Контакти R0 і DI від Modbus підключаються до D2 і D3 Arduino за допомогою послідовного програмного забезпечення. Аналогічно, ми повинні ввімкнути DE & RE high, що робиться шляхом підключення їх до контактів D7 і D8 Arduino. Датчик NPK має 4 дроти. Коричневий — це VCC, який потребує джерела живлення 5 В-30 В і може бути підключений до 5В Arduino. Штифт GND чорного кольору потрібно підключити до GND Arduino. Синій дріт, який є контактом B, під'єднується до контакту B MAX485, а жовтий дріт, який є

контактом А, під'єднується до контакту А MAX485. 0,96 - дюймовий OLED-дисплей SSD1306 є модулем I2C. Дисплей OLED VCC і GND підключені до 3,3 В і GND Arduino. Подібним чином його контакти SDA та SCL підключені до А4 та А5 Arduino.

### 3.1.3 Вибір датчика вологості ґрунту

Багато глибинна система датчиків вологості ґрунту Renke є економічно ефективною та масштабованою мережею датчиків ґрунту, яка може забезпечити моніторинг польових умов через безкоштовну хмарну платформу для управління посівами. Якщо розумно розташувати точки встановлення датчиків ґрунту на сільськогосподарській землі, тоді легко контролювати всю площу через систему. Особливості датчика глибини ґрунту:

- оболонка цього глибинного датчика ґрунту виготовлена з пластикової труби з ПВХ, а всередині випромінюється високочастотна хвиля виявлення майже 1 ГГц, яка може проникати через пластикову трубу та ефективно відчувати ґрунтове середовище;

- на багат шаровий датчик ґрунту не впливають іони солі в ґрунті, а сільськогосподарська діяльність, наприклад добрива, пестициди та зрошення, не впливатимуть на результати вимірювань, і дані точні;

- електрод датчика не має прямого контакту з ґрунтом, щоб уникнути впливу електрики на ґрунт і рослини в ґрунті;

- багатоглибинний датчик ґрунту використовує стандартний режим зв'язку Modbus-RTU485, а найдовший зв'язок становить 2000 метрів;

- підтримка зарядки напругою 10-30 В.

Для під'єднання датчика до Arduino або до макетної плати зручно використовувати натискний клемник. Оболонка датчика вологості ґрунту виготовлена з пластикової труби ПВХ, на яку не впливають іони солі в ґрунті. Сільськогосподарська діяльність, така як внесення добрив, пестицидів та зрошення, не вплине на результати вимірювань і відіграє хорошу роль у захисті контуру.



Датчик вологості ґрунту Renke (рисунок 3.5) підходить для виявлення інформації про вологість ґрунту та посуху, а також для виявлення в реальному часі погоди, води та дощу, вологи, сільськогосподарських умов, проєктів з охорони води та інших місць.

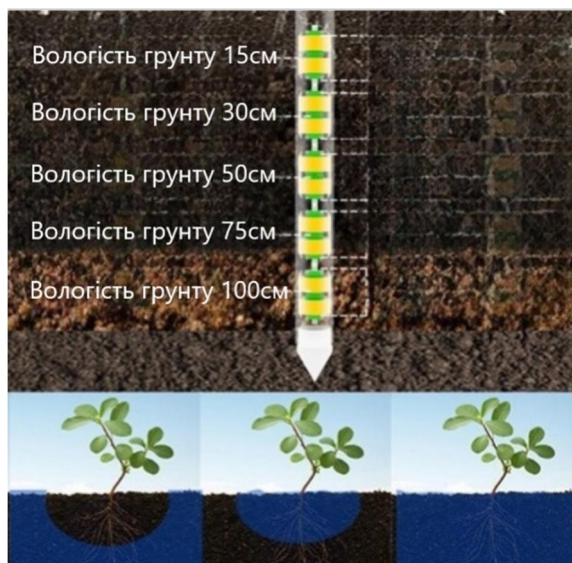


Рисунок 3.5 – Розташування контактів датчика Renke RS-\*W\*S-\*-TR-6

Кожен датчик має унікальний 64 – бітний двійковий код. Це дозволяє працювати з багатьма датчиками, які встановлено на одній шині. Вказаний принцип дозволяє використовуючи один мікроконтролер та контролювати певну кількість датчиків, які розташовані на певній відстані. Опис виводів датчика наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Класифікація контактів датчика

№	Назва виводу	Опис
1	GND	<u>Спільний вивід</u>
2	DQ	<u>Вивід даних введення/виведення. За цією лінією може подаватися «паразитне живлення»</u>
3	VDD	<u>Живлення. Коли використовується паразитне живлення VDD необхідно з'єднати зі спільним проводом</u>

На рисунку 3.6 відображено принцип логіки пам'яті датчика RS-WS-TR-6. До складу пам'яті входить оперативна енергозалежна пам'ять SRAM, а також енергонезалежна пам'ять EEPROM. Регістр температури займає перші два байти

пам'яті SRAM. Далі розташовуються регістри стану «Аварія». При старті системи контролер опитує шину на предмет наявності підключених пристроїв. Якщо один із ключів SB1 або SB2 заблокований, контролер починає опитувати датчики та визначає значення температури для кожного на LCD-індикатор і подає сигнал на мікросхеми MAX232 (DD4, Д5). Цифрові сигнали можна перетворити на перетворювачах рівнів інтерфейсу RS232, які підключаються до СОМ-порту комп'ютера, де відбувається наступна обробка даних датчиків за допомогою програми високого рівня. На рисунку 3.6 показано як організовано пам'ять датчика RS-\*W\*S-\*-TR-6. Пам'ять відображає верхню та нижню межу тригерів (ТН і ТL) та регістр конфігурації. Якщо стан «Аварія» не використовується, то регістри ТН і ТL можуть бути комірками пам'яті SRAM.

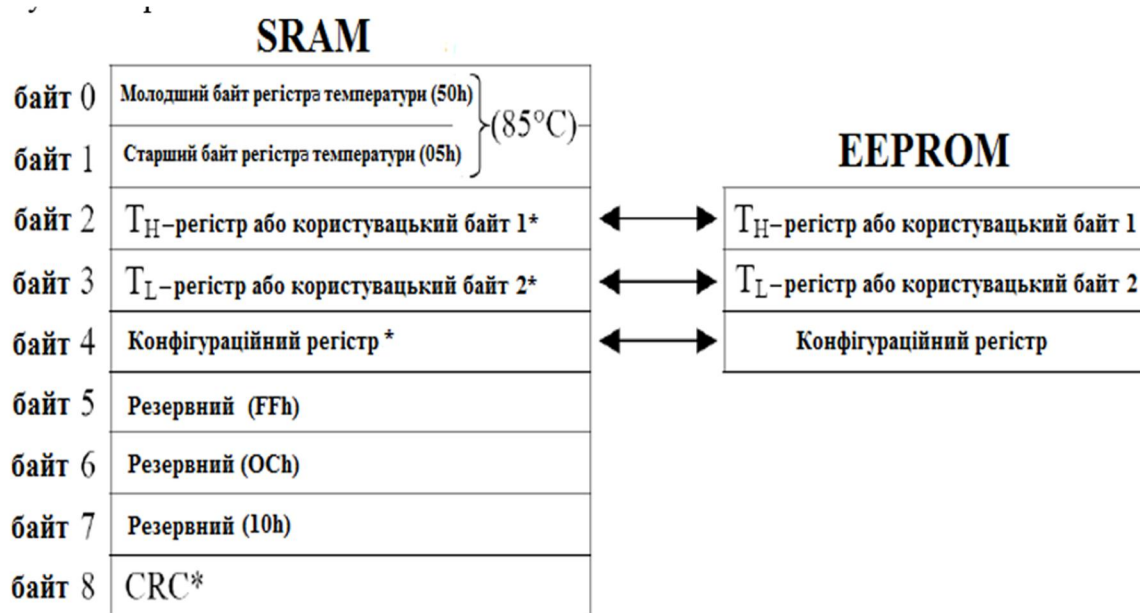


Рисунок 3.6 – Логіка пам'яті датчика

### 3.1.4 Вибір сонячної станції

Полікристалічний сонячний фотомодуль АХІОМА energy АХ-50Р (рисунок 3.7) є чудовим варіантом для систем основного або резервного живлення для систем відеоспостереження, сигналізацій, вуличних ліхтарів освітлення, метеостанцій і рухомих білбордів.

Панель потужністю 50 Вт, містить полікристалічний фотомодуль і має максимальний струм 2,8 А та напругу 17,9 В для 12-вольтових систем живлення. Розміри: 698 x 518 x 25 мм і вагу 4,5 кг. Панель має позитивний запас потужності

до 3%, що дозволяє виробляти більше заявлених характеристик за сприятливих погодних умов.



Рисунок 3.7 – Сонячна панель AXIOMA energy AX-50P

Сонячна панель оснащена захисними діодами, що дає змогу працювати ефективніше під час затінення. Панелі захищені від пилу та вологи класом захисту IP65, а 3.2-міліметрове ґартоване скло захищає її від граду, снігу та інших впливів.

#### 3.1.5. Вибір GPS\GPRS модуля

Модуль А9 GPRS/GSM/GPS від Elecrow (рисунок 3.8), можна використовувати для побудувати економічної системи збору інформації з надсиланням даних на сервер через мобільні мережі. Модуль А9 дозволяє не тільки передавати та приймати дані, але й відправляти та приймати СМС-повідомлення та голосові дзвінки, а також отримувати GPS-інформацію про місцезнаходження пристрою. Також він має один аналоговий інтерфейс, один інтерфейс ПС і два цифрових інтерфейси, які можна підключати до інших модулів розширення. Зробити GPS-трекер за допомогою цієї плати дуже легко. Також дуже легко використовувати вбудоване програмне забезпечення АТ, і можна успішно налаштувати кілька команд АТ.



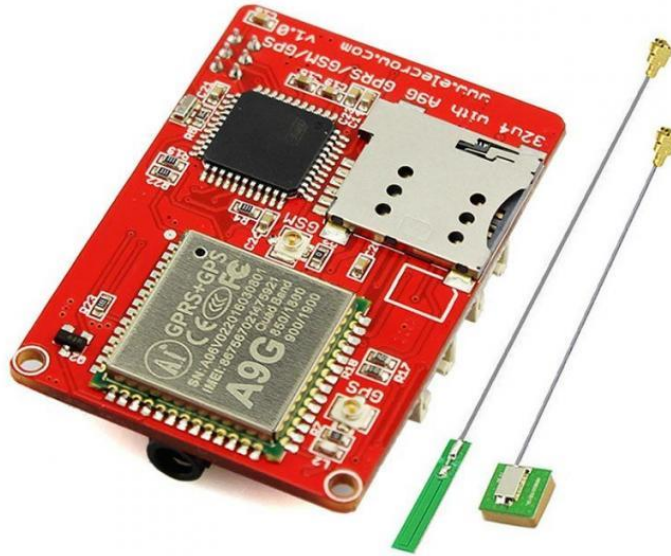


Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд модуля A9 GPRS/GSM/GPS

Характеристики модуля A9 GPRS/GSM/GPS:

- підтримка GSM/GPRS/GSM функцій;
- сумісність GSM/GPRS 850,900,1800,1900МГц;
- GPRS Class 10;
- підтримка GPS та AGPS;
- відповідність ROHS, FCC, CE, СТА сертифікатам;
- робоча температура: -30 до + 80 градусів;
- вхідна напруга живлення: 3.3В-4.2В;
- чутливість <-105 db;
- споживаний струм у режимі очікування менше 3мА;
- робоча напруга:3.7В.

Форма хвилі модульованої смуги пропускання при передачі файлів після поширення через передавач і бездротовий канал зв'язку зображена на рисунку 3.9.

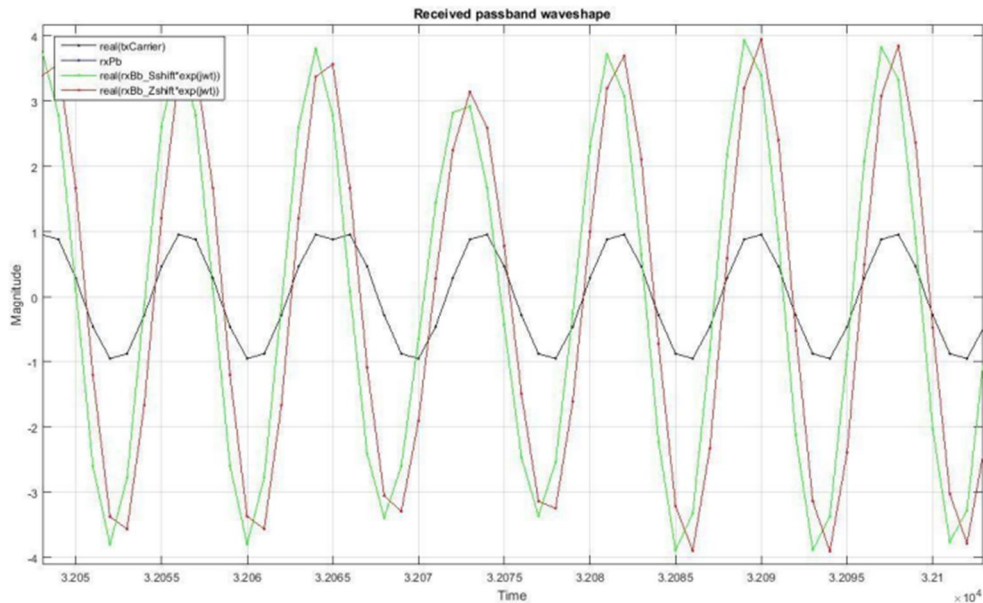


Рисунок 3.9 – Форма сигналу GPS модуля

### 3.2 Розробка програмного коду для системи збору та передачі даних про стан ґрунту

Програмування контролера, варто розпочати із підключення бібліотек датчиків системи та супутніх бібліотек для виводу даних, для функціонування системи збору та передачі даних про стан ґрунту, потрібно під час написання коду це дає можливість записувати інформацію та її передавати. Бібліотеки які були використанні, відображено на рисунку 3.10.

```
#include <Wire.h>
#include <DHT.h>
#include <AtlasScientific_pH.h>
#include <DFRobot_SoilMoistureSensor.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <TinyGPS++.h>
#include <SoftwareSerial.h>
```

Рисунок 3.10 - Підключенні бібліотеки для роботи з датчиками

Передача даних з датчиків виконується за допомогою модуля A9 GPRS/GSM/GPS від Elocrow. Тому для можливості передачі потрібно

використовувати бібліотеку SoftwareSerial та прописати в кодї логіку підключення контактів, як зображено на рисунку 3.11.

```
SoftwareSerial gsmSerial ( 0 , 1 ) ; // RX, TX

void setup ( ) {
  Серійний . початок ( 9600 ) ;
  gsmSerial . початок ( 9600 ) ;
}
```

Рисунок 3.11 - Підключення модулів до контактів плати

На рисунку 3.12 відображено фрагмент коду, де прописано увімкнення датчиків для зчитування і передачі інформації.

```
// Піни для різних сенсорів
#define DHT_PIN 2 // Підключення датчика DHT
#define pH_PIN A0 // Підключення датчика pH
#define SOIL_MOISTURE_PIN A1 // Підключення датчика вологості ґрунту
#define GPS_RX_PIN 3 // RX підключення модуля GPS
#define GPS_TX_PIN 4 // TX підключення модуля GPS

// Ініціалізація об'єктів для роботи з іншими сенсорами
DHT dht ( DHT_PIN , DHT11 ) ; // Змініть DHT11 на DHT22, якщо ви використовуєте датчик іншого типу
pH_сенсор AtlasScientific_pH ( pH_PIN ) ;
DFRobot_SoilMoistureSensor soilMoistureSensor ( SOIL_MOISTURE_PIN ) ;
SoftwareSerial gpsSerial ( GPS_RX_PIN , GPS_TX_PIN ) ; // RX, TX для модуля GPS
GPS TinyGPSPlus ;

// Налаштування для MQTT
const char * mqttServer = " ваш_mqtt_сервер " ;
const int mqttPort = 1883 ;
const char * mqttUser = " ваше ім'я_користувача_mqtt " ;
const char * mqttPassword = " ваш_mqtt_пароль " ;
const char * mqttTopicHumidity = " датчик/вологість " ;
const char * mqttTopicpH = " сенсор/ph " ;
const char * mqttTopicSoilMoisture = " датчик/вологість_ґрунту " ;
const char * mqttTopicGPS = " сенсор/gps " ;
```

Рисунок 3.12 - Увімкнення всіх датчиків для зчитування інформації

У функції void loop прописуються параметри зчитування та відправка даних на сервер (рисунок 3.13). Також вказується час повторення циклу між вимірюваннями delay (86400), це означає що дані зніматимуться кожні 24 години, для кращого розуміння динаміки кореляції.

```

void loop() {
  // Зчитування та відправка даних
  readAndPublishpH();
  readAndPublishSoilMoisture();
  readAndPublishGPS();

  delay(86400); // Затримка між вимірюваннями та відправленням даних
}

```

Рисунок 3.13 - Функція void loop

Функція void readAndPublish (рисунок 3.14) призначена для зчитування значення датчика та передачі цього значення на MQTT протокол. Вона може бути викликана в основному циклі loop для періодичного оновлення та публікації значень

```

void readAndPublishpH() {
  float pH_value = pH_sensor.getpH();
  Serial.print("pH Value: ");
  Serial.println(pH_value);
  // Відправка даних на MQTT
  client.publish(mqttTopicpH, String(pH_value).c_str());
}

void readAndPublishSoilMoisture() {
  int soilMoisture = soilMoistureSensor.readSoilMoisture();
  Serial.print("Soil Moisture: ");
  Serial.println(soilMoisture);
  // Відправка даних на MQTT
  client.publish(mqttTopicSoilMoisture, String(soilMoisture).c_str());
}

void readAndPublishGPS() {
  while (gpsSerial.available() > 0) {
    if (gps.encode(gpsSerial.read())) {
      // Отримання GPS-координат та відправка їх на MQTT
      String gpsData = String(gps.location.lat(), 6) + "," + String(gps.location.lng(), 6);
      Serial.print("GPS Data: ");
      Serial.println(gpsData);
      client.publish(mqttTopicGPS, gpsData.c_str());
    }
  }
}

```

Рисунок 3.14 - Функція void readAndPublish

На сервер дані надходять у вигляді JSON-об'єкта, що дає можливість легко розпізнати та візуалізувати їх. Тобто для датчика вологості ґрунту використовується ключ "humidity", а для датчика кислотності ключ "soilAcidity". Кожен параметр має значення ("value"), одиниці вимірювання ("unit") та мітку

часу ("timestamp"). Також за допомогою GPS модуля є можливість розділити локації ("location") з координатами широти та довготи, як показано на рисунку 3.15.

```
{
  "sensorData": {
    "humidity": {
      "value": 65.3,
      "unit": "%",
      "timestamp": "2023-10-31T01:11:56"
    },
    "soilAcidity": {
      "value": 6.8,
      "unit": "pH",
      "timestamp": "2023-10-31T01:11:56"
    }
  },
  "location": {
    "latitude": 49.5535 ,
    "longitude": 25.5948
  }
}
```

Рисунок 3.15 - Атрибути JSON об'єктів

Отримані дані можна відобразити графічним способом за допомогою ПЗ Data Logger, який має можливість читати файли формату DAT (.dat), як показано на рисунку 3.16.

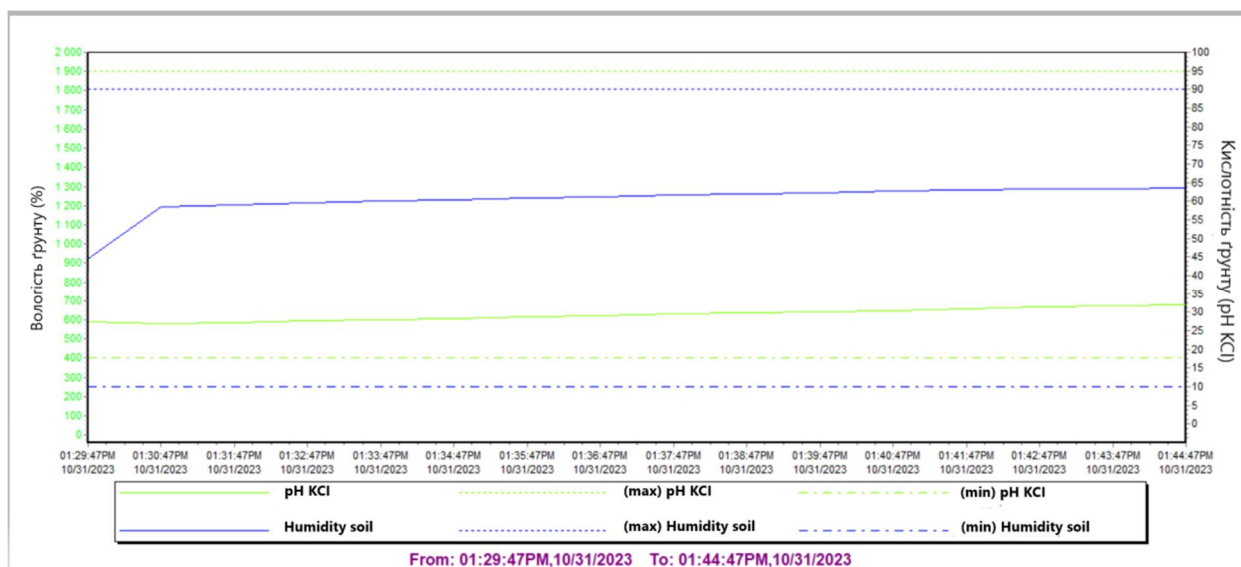
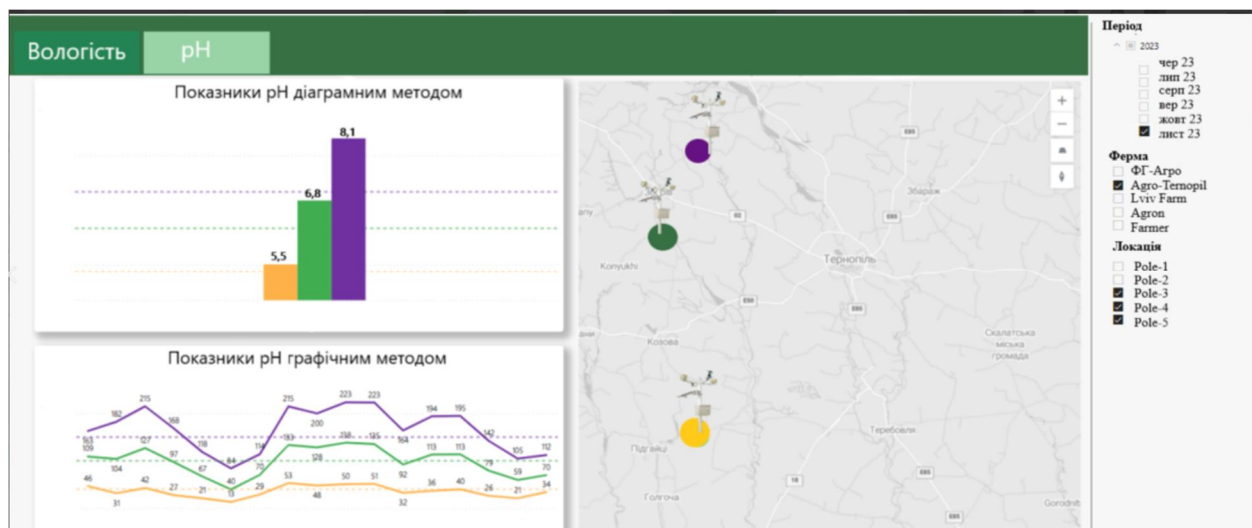


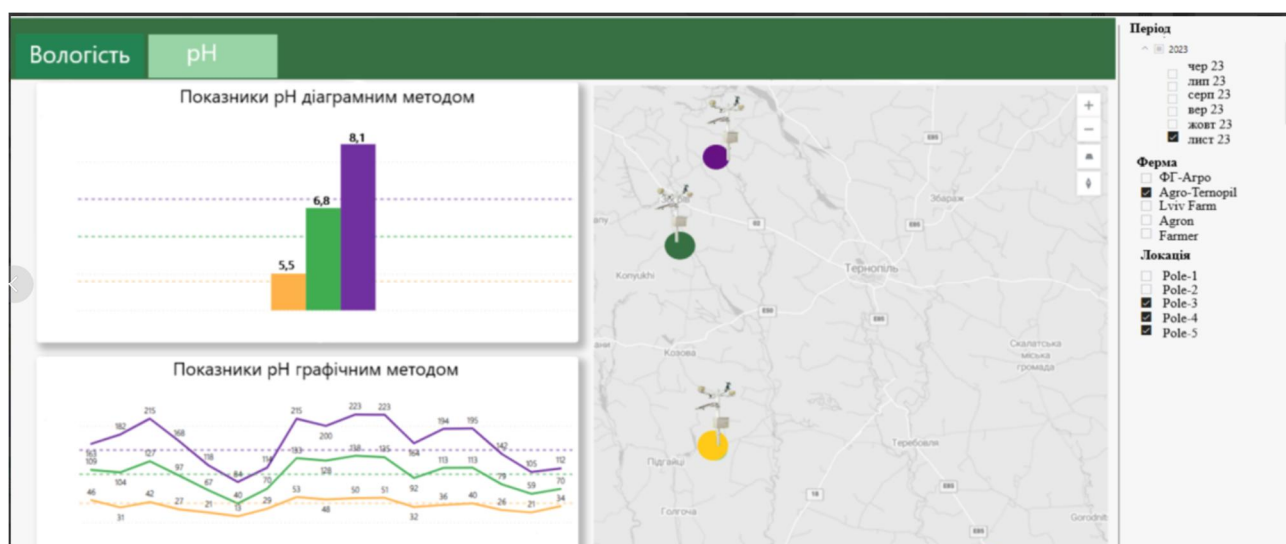
Рисунок 3.16 – Графічне відображення даних



Фінішним етапом є створення звіту в Power BI на основі отриманих даних, таких як вологість ґрунту (%) та кислотність (pH), а також локації дослідних полігонів із (latitude/ longitude), як показано на рисунках 3.17 (а, б).



а)



б)

Рисунок 3.17 — Інтерактивна візуалізація

Діаграми дають змогу у вигляді діаграми/графіка/геопозиції аналізувати стан кислотності та вологості ґрунтів в розрізі періоду/ферми/поля за допомогою відповідних фільтрів, що в свою чергу дозволяє моніторити та фіксувати кореляцію стану ґрунту та відповідно до отриманих даних приймати агротехнічні рішення.

В результаті нам вдалося спроектувати економічно ефективну автоматичну метеостанцію з автономним живленням від сонячної панелі. Запропонована

система може вимірювати та передавати дані про стан ґрунту, а саме: вологість та кислотність (рН) на досліджуваному полі без необхідності йти на станцію. Важливим є також можливість доступу до даних з будь-якої точки світу через вебсторінку.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської роботи нам вдалося спроектувати економічно ефективну автоматичну метеостанцію з автономним живленням від сонячної панелі. Запропонована система може вимірювати та передавати дані про стан ґрунту, а саме: вологість та кислотність (рН) на досліджуваному полі без необхідності йти на станцію. Важливим є також можливість доступу до даних з будь-якої точки світу через веб-сторінку.

На функціонування сільськогосподарських підприємств та якість відповідної продукції має вплив велика кількість факторів, серед яких властивості родючого шару землі (ґрунту).

У процесі даного дослідження мною було виділено важливі показники стану ґрунту, а саме вологість та кислотність, обґрунтовано їх вплив на урожайність культур та відображено оптимальні показники для різних типів рослин. Проведено огляд та аналіз існуючих метеорологічних станцій. Проаналізовано технології передачі даних за допомогою GPRS сигналу та ознайомлено із особливостями роботи MQTT протоколу.

В другому розділі розглянуто характеристики ґрунту та визначено необхідні показники для моніторингу. Проаналізовано методи збору інформацію з датчиків та сенсорів. Спроектовано блок схему роботи системи. Представлено алгоритм роботи та логіку причини наслідкових зав'язків.

В третьому розділі було обрано необхідні компоненти для роботи системи: контролер Arduino; датчик кислотності ґрунту RS-PH-N01-TR-1; датчик вологості ґрунту Renke RS-\*W\*S-\*-TR-6; сонячну станцію AXIOMA energy AX-50P; АКБ; DC/DC перетворювач; модуль зв'язку A9 GPRS/GSM/GPS. Детально описані схеми підключення кожного датчика та модуля окремо з основною платою. Розроблено програмне забезпечення в середовищі Arduino, яке дозволяє знімати дані з датчиків та передавати на сервер через GPRS.

Отримані дані представлені у вигляді графіків і візуалізовані за допомогою дашбордів для кращої аналітики та прийняття рішень за отриманими результатами.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія виробництва продукції рослинництва: навч. посіб. Ч.1 / Мельник С.І., Муляр О.Д., Кочубей М.Й., Іванцов П.Д. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 282 с.
2. Практикум із землеробства / Кравченко М.С., Царенко О.М., Міщенко Ю.Г. та ін. – К.: Мета, 2003. – 318 с.
3. Божко Л. Ю. Агрометеорологічні прогнози : практикум : навчальний посібник / Л.Ю.Божко, О.А.Барсукова - Одеса: ТЕС, 2012. – 229 с.
4. Польовий А. М. Агрометеорологічні прогнози: підручник / А.М. Польовий, Л.Ю. Божко, Т.І. Адаменко - Одеса: ТЕС, 2017. - 508 с.
5. Сніжко С. І. Метеорологія: підруч. для студ. / С. І. Сніжко, Л. В. Паламарчук, В. І. Затула. - К. : Київський університет, 2010. - 592 с.
6. Заблоцький Ф. Д. ГНСС - метеорологія: навч. посіб. / Ф.Д. Заблоцький. - Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2013. - 95 с.
7. Нетробчук І. М. Метеорологія та кліматологія : методичні рекомендації до лабораторних робіт / І.М. Нетробчук. - Луцьк: Вежа -Друк, 2019. - 60 с.
8. Настанова гідрометеорологічним станціям і постам. Випуск 3, ч.1: Метеорологічні спостереження на станціях. – К.: Ніка-Центр, 2011. – 280 с
9. Паламарчук Л. В. Метеорологічні прилади та вимірювання / Л.В. Паламарчук, О.Г. Шевченко. - Київ: Інтерконтиненталь – Україна, 2012. - 123 с.
10. Колодеєв Є.І. Методи гідрометеорологічних вимірювань. Навчальна польова практика: навч. посіб. / Є.І. Колодеєв, О.М. Гриб. - Одеса: ТЕС, 2009. - 74 с.
11. Perry Lea. IoT and Edge Computing for Architects 2nd edition / Lea Perry – Packt Publishing, 2020. – 632 с
12. Gaston C. Hillar. MQTT Essentials – A Lightweight IoT Protocol / C. Hillar Gaston – Packt Publishing, 2017. – 280 с.
13. MQTT Packet Structure [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.bytesofgigabytes.com/mqtt/mqtt-protocol-packet-structure>

14. Сенсорні технології [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://library.oapen.org/viewer/web/viewer.html?file=/bitstream/handle/20.500.12657/28153/1001841.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
15. Волошин І. І. Загальне землезнавство: навч. посіб. для студ. геогр. спец. вищ. навч. закл. / І. І. Волошин. - Ніжин : Редакційно-видавничий відділ НДПУ ім. М.Гоголя, 2002. - 294 с.
16. Dora Neina, "The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation", *Applied and Environmental Soil Science*, vol. 2019, Article ID 5794869, 9 pages, 2019.
17. B. W. Hütsch, S. Zhang, K. Feng, F. Yan, and S. Schubert, "Effect of pH on denitrification losses from different arable soils," in *Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences*, W. J. Horst, Ed., pp. 962-963, Springer, Berlin, Germany, 2001.
18. R. A. Dahlgren, "Biogeochemical processes in soils and ecosystems: from landscape to molecular scale," *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 88, no. 1–3, pp. 186–189, 2006.
19. FAO, Revised World Soil Charter, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy, 2015.
20. FAO and ITPS, Status of the World's Soil Resources (SWSR)—Main Report, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy, 2015.
21. Методи та прийоми моніторингу вологості ґрунту [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://wyoextension.org/publications/html/B1331/>
22. N.C. Brady and R.R. Weil *The Nature and Property of Soils*, Prentice Hall, Upper Saddle Hall, NJ, USA, 1999.
23. R. E. White *Principles and Practice of Soil Science: The Soil as a Natural Resource*, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2006.
24. G. P. Gillman "An analytical tool for understanding the properties and behaviour of variable charge soils," *Soil Research*, vol. 45, no. 2, pp. 83–90, 2007.
25. A. Kabata-Pendias *Trace Elements in Soils and Plants*, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2011.

26. Z. Rengel, “Genotypic differences in micronutrient use efficiency in crops,” *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, vol. 32, no. 7-8, pp. 1163–1186, 2001.

27. D. Curtin, M. E. Peterson, and C. R. Anderson, “pH-dependence of organic matter solubility: base type effects on dissolved organic C, N, P, and S in soils with contrasting mineralogy,” *Geoderma*, vol. 271, pp. 161–172, 2016.

28. T.-H. Anderson, “Microbial eco-physiological indicators to assess soil quality,” *Agriculture, Ecosystems & Environment*, vol. 98, no. 1–3, pp. 285–293, 2003.

29. Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник / В.П. Бабак, С.В. Бабак, В.С. Єременко та ін.; за ред. чл.-кор. НАНУ В.П. Бабака.—К.: УН-Т новітніх технологій, 2017. - 496 с.

30. Вимірювальні прилади [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [https://www.stepsystems.de/media/katalog\\_ua\\_web.pdf](https://www.stepsystems.de/media/katalog_ua_web.pdf)

31. Датчики вологості [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/23/6934>

32. Adalakun, I.A.; Sri Ranjan, R. Design of a multilevel TDR probe for measuring soil water content at different depths. *Trans. Asabe* 2013, 56, 1451–1460.

33. Ito, Y.; Chikushib, J.; Miyamoto, H. Multi-TDR probe designed for measuring soil moisture distribution near the soil surface. In *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, Brisbane, Australia, 1–6 August 2010*.

34. Нагахаче, ЕААД; Nagahage, ISP; Fujino, Т. Калібрування та валідація недорогого ємнісного датчика вологи для інтеграції автоматизованої системи моніторингу вологості ґрунту. *Agriculture*, 2019. – 141 р.

35. Digital-output relative humidity & temperature sensor/module – DHT11 / Resistive-type humidity and temperature module/sensor [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://arduino.ua/docs/DHT11.pdf>

36. Датчики вологості [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.renkeer.com/soil-moisture-sensors-for-agriculture/>