

АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВЕЛИЧИН ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ҐРУНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА

*Київський кооперативний інститут бізнесу і права, м. Київ, Україна

Анотація. Сучасні агротехнології передбачають широке використання інформаційно-технічних систем для отримання оперативної інформації про агробіологічний стан ґрунтового середовища. Така інформація є основою оперативного керування агробіологічним потенціалом поля. Тому виникає необхідність у розробці нових методів оперативного моніторингу агробіологічного стану сільськогосподарських угідь та оперативного прийняття рішення стосовно використання змінних норм внесення технологічного матеріалу. Очевидно, що за таких умов виникає необхідність у розробці та використанні принципово нових підходів до ведення агропромислового виробництва, що полягає у забезпеченні належної якості виконання технологічних операцій. Одним із сучасних елементів інформаційно-технічної системи є системи для вимірювання електропровідних властивостей ґрунтового середовища. Тому розгляд апаратного забезпечення інформаційно-технічної системи для вимірювання електропровідності ґрунтового середовища є важливим та актуальним у сучасних наукових дослідженнях. У статті розглянуто вимоги та архітектуру апаратного забезпечення інформаційно-технічної системи, призначеної для вимірювання електропровідності та суміжних параметрів ґрунтового середовища. Проаналізовано методи вимірювань (двоелектродний, чотириелектродний, електрична томографія), описано складові апаратної частини (джерело струму/збудження, електроди, підсилювачі/фільтри, АЦП, контролери, комунікації, живлення), наведено рекомендації щодо вибору компонентів, калібрування, підвищення точності і стійкості вимірювань, а також підходи до тестування й валідації. Окремо обговорено питання захисту, заземлення, уніфікації інтерфейсів та інтеграції з програмним забезпеченням для обробки й передавання даних.

Ключові слова: електропровідність ґрунту, вимірювання опору, чотириелектродний метод, апаратне забезпечення, АЦП, сигнал-джерело, калібрування, електрична томографія.

Abstract. Modern agricultural technologies involve the widespread use of information and technical systems to obtain timely information about the agrobiological state of the soil environment. Such information is the basis for operational management of the agrobiological potential of fields. Therefore, there is a need to develop new methods for operational monitoring of the agrobiological conditions of agricultural lands and for operational decision-making regarding the use of variable rates of technological material application. It is obvious that under such conditions there is a need to develop and use fundamentally new approaches to conducting agro-industrial production, aimed at ensuring the proper quality of technological operations. One of the modern elements of the information and technical system is a system for measuring the conductive properties of the soil environment. Therefore, analyzing the hardware of the information and technical system for measuring the electrical conductivity of the soil environment is important and relevant in modern scientific research. The article reviews the requirements and architecture of the hardware of the information and technical system designed to measure the electrical conductivity and related parameters of the soil environment. The measurement methods (two-electrode, four-electrode, and electrical tomography) are analyzed, the components of the hardware are described (current source/excitation, electrodes, amplifiers/filters, ADC, controllers, communications, power supply), and recommendations are given for the selection of components, calibration, improving the accuracy and stability of measurements, as well as testing and validation approaches. Additionally, the issues of protection, grounding, interface unification, and integration with software for data processing and transmission are discussed.

Keywords: soil electrical conductivity, resistance measurement, four-electrode method, hardware, ADC, signal source, calibration, electrical tomography.

1. Вступ. Аналіз досліджень та публікацій за темою дослідження

Визначення електричних параметрів ґрунту (питомої провідності/опору, електропровідності, електричної ємності) має широке застосування в геофізичних дослідженнях, агрономії, інженерній геології, будівництві та екологічному моніторингу. Для отримання надійних даних потрібна комплексна інформаційно-технічна система, де ключову роль відіграє апаратне забезпечення [1–10].

У сучасних умовах сільського господарства та екологічного моніторингу дедалі більше значення набуває оперативне вимірювання параметрів ґрунтового середовища. Одним із важливих показників є електропровідність ґрунту — характеристика, що відображає здатність ґрунту проводити електричний струм і яка може бути опосередкованим показником вологості, солоності, структурних характеристик та інших властивостей.

Апаратне забезпечення (hardware) виступає ключовим компонентом інформаційно-технічної системи, яка дозволяє здійснювати вимірювання на польових ділянках, передавати дані, аналізувати їх і приймати рішення. У даній статті розглянуто, які складові необхідні для такого апаратного забезпечення, як вони взаємодіють і які вимоги до них пред'являються.

Мета статті — розробити апаратне забезпечення інформаційно-технічної системи для вимірювання електропровідності ґрунтового середовища.

Постановка проблеми

Вимірювання електропровідності ґрунту Електропровідність σ (S/m) і питомий опір ρ ($\Omega \cdot m$) пов'язані, як $\sigma = 1/\rho$. У польових умовах заміри виконуються за допомогою електродних масивів: двоелектродного, чотириелектродного (Wenner, Schlumberger), диполь-дипольних та інших конфігурацій. Для простих точкових вимірювань часто застосовується чотириелектродний метод, який зменшує вплив контактного опору електродів: через крайні електроди подається струм I , а між внутрішніми вимірюється падіння напруги U ; далі обчислюються опір $R = U/I$ і питомий опір за формулами, що залежать від геометрії електродів.

Для аграрного моніторингу часто використовують методи вимірювання електропровідності або опору ґрунту, що дозволяють отримати інформацію про гетерогенність поля, визначити зони зі зміненою вологою або солоністю [8, 9]. Оскільки ґрунт — це пористе середовище, електропровідність залежить від пористості, водонасичення, солей у воді-порі, а також від геометрії пористої структури. Наприклад, моделі, розроблені для насичених пористих середовищ, враховують провідність рідини, поверхневу провідність мінералів та геометричні параметри пор. Практично вимірювання проводять через електроди, що контактують із ґрунтом, або через контакт без прямого введення в ґрунт (індукційні методи). В аграрному використанні популярним є метод чотирьох електродів, а також кондуктометричні датчики, які можуть бути змонтовані на рухомих агрегатах.

Важливо враховувати, що вимірювання електропровідності має бути скориговане з огляду на температурні умови, глибину вимірювання, контакти електродів, а також вплив вологості й солоності. Ці впливи потрібно враховувати при побудові апаратної частини системи.

Вимоги до апаратного забезпечення

Апаратна система має забезпечувати:

- точну та стабільну генерацію збуджуючого струму або напруги (DC або AC);
- високочутливе вимірювання падіння напруги з мінімальним внеском власного шуму і похибок;
- компенсацію впливу температури, вологості та контактного опору;

- можливість роботи в польових умовах (температурні межі, пиловологозахист, живлення від батарей/сонячних панелей);
- ізоляцію та безпеку для оператора;
- масштабованість (масив електродів, мультиплексування для ERT);
- інтерфейси для передачі/збереження даних (локально та дистанційно).

2. Основні апаратні блоки системи

Нижче наведено типову блок-схему апаратної частини: блок збудження → електроди/електродний масив → підсилювач диференціального сигналу → фільтр та антирежимні елементи → АЦП → контролер/процесор → пам'ять/комунікація → живлення та система керування.

3. Завдання інформаційно-технічної системи моніторингу ґрунту

Інформаційно-технічна система (ІТС) моніторингу ґрунтового середовища покликана виконувати такі основні функції:

- збір даних про електропровідність (і часто супутніх параметрів: вологість, температура, солоність) у режимі реального часу або з певним кроком;
- передача даних до централізованої бази або безпосередньо до обробки;
- обробка, аналіз і візуалізація даних (карти, графіки);
- інтеграція з іншими системами (географічні системи, рішення для змінного внесення добрив тощо).

Наприклад, в одному з досліджень зазначено, що система оперативного моніторингу електропровідності ґрунту дозволила підвищити прибуток на 20–30 % за рахунок оптимізації норм внесення технологічних матеріалів.

Завдання апаратного забезпечення — забезпечити надійне, точне та адаптоване до польових умов вимірювання. Ось кілька конкретних вимог:

- стійкість до умов навколишнього середовища (волога, пил, температура, механічні навантаження);
- можливість роботи в польових умовах (на транспортному засобі, ручному пристрої);
- забезпечення відповідної точності та повторюваності вимірювань;
- забезпечення належної частоти вибірки та геомаркування (GPS), якщо потрібно, і пам'яті та комунікації для подальшої обробки.

Отже, апаратне забезпечення має бути продумано системно: сенсори + модулі обробки + зв'язок + живлення.

4. Вимірювальні електроди та сенсори

Одна з найкритичніших частин — це електроди або сенсори, які безпосередньо контактують із ґрунтом або виконують вимірювання провідності. Ось основні аспекти.

Типи електродів

Контактні електроди — два чи чотири електроди, закопані або опущені в ґрунт, між ними проходить струм і вимірюється напруга (кондуктометричні). dspace.mnau.edu.ua.

Індукційні/безконтактні сенсори — не потребують прямого контакту; вимірювання проводиться через змінне магнітне поле або індуктивно-ємнісне.

Мультисенсорні модулі — наприклад, датчик «8-in-1» ґрунту, що містить вимір вологості, pH, електропровідності і т.д. uk.hondetechco.com.

Вимоги до електродів

Матеріал: нержавіюча сталь, платина, графіт — зносостійкі, стійкі до корозії.

Розташування: правильна відстань між електродами, глибина занурення, площа контакту.

Конфігурація: двоелектродна, чотириелектродна (часто чотириелектродна менш чутлива до контактного опору).

Контакт із ґрунтом: добрий механічний контакт, уникнення повітряних проміжків.

Механічна стабільність: щоб не змінювалася глибина чи розміщення під час руху пристрою. У прикладі описано: «тип електроду: стрижень; диск; тор; сфера; відстань між контактами, м; площа контакту, мм²» як налаштування системи.

Вплив факторів

Вологість ґрунту: збільшення вологості підвищує провідність.

Солоність: розчинені іони підвищують провідність.

Температура: підвищення температури знижує опір, треба компенсувати.

Структура ґрунту: щільність, пористість, тип частинок впливають на зарядоперенесення та шлях струму.

Отже, апаратне рішення має включати засоби вимірювання і контролю цих факторів або їх компенсацію.

5. Архітектура апаратного забезпечення системи

Розглянемо структурно, з яких блоків складається апаратне забезпечення ІТС для вимірювання електропровідності ґрунту.

Типова архітектура містить:

- Вимірювальні електроди/сенсори — контактують із ґрунтом або ж виконують індукційне/безконтактне вимірювання.
- Аналоговий модуль підсилення/фільтрації — оскільки сигнал з електродів може бути слабким, потребує попереднього підсилення, фільтрації шуму, захисту від перешкод.
- АЦП (аналого-цифровий перетворювач) — перетворює аналоговий сигнал у цифровий, який може бути оброблений мікроконтролером чи іншою логікою.
- Мікроконтролер або вбудована система обробки — відповідає за зчитування даних, попередню обробку (усереднення, згладжування), маркування (GPS, час), зберігання.
- Комунікаційний модуль — передача даних на зовнішній сервер чи інтерфейс (Bluetooth, GSM/4G, WiFi, LoRaWAN).
- Живлення та енергетика — акумулятор, сонячна панель, захист, стабілізатори.
- Корпус, кріплення та механіка — для польових умов, забезпечення контакту з ґрунтом, захист від пилу/вологи, мобільність (на транспорті чи ручному пристрої).

Як приклад у роботі описано функціональну схему електропровідного монітора ґрунту: сигнал від робочих електродів → підсилення → АЦП → головний модуль → дисплей/інтерфейс. journals.kntu.kherson.ua+1.

В архітектурі слід враховувати також калібрування, компенсацію температури, механічну стабільність електродів, зручність обслуговування.

5.1. Джерело збудження (current/voltage source)

Типи: постійний (DC), змінний (AC, синус/трикут), імпульсний. Для зменшення поляризації електродів частіше використовується змінне збудження (низькочастотна синусоїда або квадрат).

Характеристики: стабільність амплітуди струму, малий вихідний імпеданс джерела, можливість забезпечити необхідну напругу на електродах при великих опорах.

Рекомендації: використання точного струмового джерела (струмовий генератор на базі операційного підсилювача або драйвера з датчиком струму) з амплітудною корекцією, захистом від перевантаження.

5.2. Електроди та електродні масиви

Матеріали: мідь, нержавіюча сталь, графіт, платина (польові електроди зазвичай сталені або мідні стрижні).

Конфігурації: Wenner (рівномірна відстань $a-a-a$), Schlumberger (внутрішні менші), dipole-dipole, pole-dipole.

Питання: контактний опір, поляризація (особливо при DC), механічна надійність, очищення та підготовка поверхні. Для довготривалих мереж важливо застосовувати неруйнівні покриття та стабільні контакти.

5.3. Сигнальне підсилення і фільтрація

Диференціальні підсилювачі: важливі для вимірювання малих падінь напруги на великому загальному потенціалі. Інструментальні підсилювачі (INA) з високою CMRR (common-mode rejection ratio) — критично.

Фільтри: аперіодичні для боротьби з високочастотними шумами, смугові фільтри для витягування синусоїдних компонентів (при АС-вимірюваннях), антиаліасні фільтри перед АЦП.

Екранування і охоронні контури (guarding) — застосовуються для мінімізації струмів витоку й помилок вимірювання малих сигналів.

5.4. Аналого-цифрове перетворення (АЦП)

Вимоги: висока роздільна здатність (16–24 біт), низький шум, диференційний вхід або попередній диференційний підсилювач.

Типи: дельта-сигма АЦП добре підходять для низькочастотних, високоточних вимірювань; SAR АЦП — для швидких із помірною роздільною здатністю.

Частота вибірки: відповідає частоті збудження та необхідності часу вимірювання; для моночастотного вимірювання достатньо 1–10 кС/с, для спектральних вимірювань — вище.

Приклади: ADS124S08/ADS1256 (Texas Instruments), AD7124/AD7768 (Analog Devices), МбS спеціалізовані 24-бітні модулі.

5.5. Контролер та обробка сигналу

MCU/SoC/FPGA: вибір залежить від складності алгоритмів. Для полів — мікроконтролери STM32 або ESP32; для ERT/високошвидкісних застосувань — FPGA або SoC на базі Zynq.

Завдання: генерація сигналу збудження (цифро-аналогове перетворення/ПІД-контроль), синхронна вибірка, первинна цифрова обробка (ритмічне усереднення, фільтрація, FFT для спектрального аналізу), контроль комутації електродів, логіка верифікації та самодіагностики.

5.6. Система комутації (для масивів електродів та ERT)

Мультиплексори: аналогові перемикачі, реле (електромеханічні або твердотільні) для комутації між електродами.

Вимоги: низький контактний опір, відсутність внеску у вимірювану напругу, висока надійність. Для високих напруг часто застосовують реле з відкритими контактами або спеціальні релейні матриці.

5.7. Живлення та енергетика

Варіанти: акумулятори (Li-ion), батареї (LiFePO₄ для більшої безпеки), сонячні панелі з контролерами зарядки, блоки перетворення для стабілізації напруг.

Енергозбереження: режими сну для MCU, оптимізація періодичності вимірювань, енергоефективні комунікаційні модулі (LoRaWAN, NB-IoT).

Захист: від перенапруг, коротких замикань, емісій при грозі (використання газорозрядних трубок, TVS-діодів).

5.8. Комунікації та зберігання даних

Інтерфейси: USB, RS-485/Modbus (польові мережі), Ethernet (станції), GSM/3G/4G/NB-IoT для віддаленої передачі, LoRa/LoRaWAN для низької енерговитрати.

Зберігання: локальний лог-пристрій (SD-картка), буферизація при втраті зв'язку, протоколи шифрування для безпеки.

5.9. Корпус, захист і монтаж

Корпус з IP-класом залежно від умов (IP65–IP67 для зовнішньої інсталяції), механічна міцність, відводи для кабелів, герметичні конектори.

Рекомендовано використання екранованих кабелів для сигналів низького рівня. Методи вимірювань і вплив апаратури 5.1. Чотириелектродний метод (Wenner/Schlumberger).

Практика: генерація струму через крайні електроди, вимір напруги між внутрішніми; розрахунок питомого опору з урахуванням геометричних коефіцієнтів.

Апаратні наслідки: потрібна висока точність струмового джерела; підсилювачі мають високий CMRR; належне калібрування геометричного коефіцієнта.

5.10. Електрична томографія (ERT)

Потребує комутації великої кількості електродів і багатоточкових вимірювань. Результат — розподіл опору в підповерхні (інверсійні задачі).

Апаратні вимоги: мультиплексування, синхронізація збудження і вимірювань, висока стабільність і повторюваність, вимоги до безперервної роботи та логіки вибору схем.

5.11. Частотні залежності (spectral conductivity, induced polarization)

Для інтерпретації корисна багаточастотна експертиза (від десятків Гц до декількох кГц або вище). Це потребує синхронного генератора з можливістю частотного сканування і обробки спектра.

Похибки, джерела шуму та шляхи їх мінімізації

Шуми: тепловий шум резисторів, флікер-шум компонентів, ЕМІ від мережі, електростатичні наведення.

Похибки: контактний опір, поляризація електродів, нестабільність струму/напряму збудження, зміни температури.

Заходи: використання диференційного вимірювання і охорони (guard), екранування кабелів, фазове вимірювання для усунення постійних компонентів, калібрування проти еталонів, температурна компенсація, програмні алгоритми фільтрації та усереднення.

Калібрування та валідація

Лабораторні калібрування: використання еталонних резисторів і калібрувальних ванн з відомою електропровідністю (розчини з контролем провідності).

Польові калібрування: порівняння з еталонними приладами (комерційні референтні мегаомметри/провідноміри), регулярні перевірки контактного опору, тест на системну стабільність.

Методика: перевірка лінійності (з різними значеннями струму/напруги), тест повторюваності, температурний кейс-тест.

Безпека та відповідність стандартам

Стандарти: ASTM G57 (Wenner four-pin method for soil resistivity), IEEE 81 (grounding measurement practices) та інші локальні стандарти для вимірювань електричних величин.

Безпека: гальванічна ізоляція операторських ланцюгів, обмеження струму/напруги, запобіжники, засоби захисту від удару блискавкою, ізоляція приладу, маркування.

Інтеграція з програмним забезпеченням і аналіз даних ПЗ повинна надавати: налаштування експерименту (схеми комутації, частоти, амплітуда), збір даних, фільтрацію та усереднення, візуалізацію результатів (карти електропровідності для ERT), збереження та передачу.

Алгоритми: обробка по вибірці (lock-in amplifier-подібний підхід для синусоїдних вимірювань), FFT для мультичастотних досліджень, інверсійні алгоритми для ERT (Tikhonov regularization, Occam inversion).

6. Комунікаційні модулі та обробка даних

Після збору й оцифрування даних необхідно їх передати на обробку, зберігання або інтегрувати в систему прийняття рішень.

Комунікація

Локальна пам'ять: дані записуються на карту пам'яті, потім вивантажуються вручну.

Бездротовий зв'язок: Bluetooth, WiFi, LoRa, GSM/4G — залежно від віддаленості ділянки.

GPS/ГНСС-модуль: геотегування кожної точки вимірювання, щоб створити карту змінності ґрунтових властивостей. Наприклад, у системі вказано підтримку GPS і виведення координат над кожною точкою. journals.kntu.kherson.ua.

Обробка даних

Попередня обробка: усереднення, згладжування, виявлення шуму.

Формування карти: з прив'язкою до координат, створення картограм електропровідності journals.kntu.kherson.ua.

Інтеграція з іншими даними: наприклад, скориговані норми внесення добрив на основі карти електропровідності. agro-business.com.ua.

Вимоги до апаратного забезпечення:

- модулі мають бути енергоефективними;
- забезпечувати захист і надійність (на випадок польових умов);
- забезпечувати можливість оновлення прошивки/конфігурації;
- мати інтерфейси для обслуговування (USB, індикатори стану).

Отже, апаратна платформа має бути гнучкою і готовою до інтеграції в більш широку ІТС.

Модулі сигналу: підсилення, аналого-цифрове перетворення, фільтрація.

Після отримання сигналу від сенсора/електрода необхідна його обробка, щоб отримати коректне цифрове значення для подальшої обробки.

Компоненти:

Підсилювач — сигнал від електродів зазвичай слабкий; потрібен підсилювач з низьким шумом.

Фільтрація — щоб усунути перешкоди (електромагнітні, шум від руху агрегату, температурні флуктуації).

АЦП — потрібна достатня розрядність (наприклад, 12-біт, 16-біт) залежно від точності, бажано з програмною чи апаратною компенсацією температури.

Мікроконтролер / вбудований модуль — обробка сигналу, калібрування, зберігання та передача.

Захист і стабілізатори — захист від перенапруг, стабілізація живлення, екранування кабелів.

Наприклад, в одній системі зазначено: «сигнал від робочих електродів перетворюється на аналого-цифровий сигнал блоку керування... після підсилення».

Особливості для польових умов:

- використання екранованих проводів для мінімізації шуму;
- регульований вибір вимірювального струму (щоб не впливати на ґрунт);
- можливість вибору режиму: вивід напруги, опору, електропровідності.

Загалом, важливо, щоб апаратна частина забезпечувала високу точність, надійність та стабільність сигналу.

Приклад архітектури польової станції (рекомендація)

Компоненти:

- міцний корпус IP65 із посадкою для 16-рокового масиву електродів;
- струмове джерело $\pm 10\text{--}200\text{ mA}$ зі стабілізацією (залежно від опору ґрунту), можливістю вибору частоти $1\text{ Hz--}10\text{ kHz}$;
- диференційний підсилювач з $\text{CMRR} > 100\text{ dB}$ (INA із захистом);
- 24-бітний дельта-сигма АЦП із синхронним вибиранням;
- матричний перемикач на базі надійних реле для комутації електродів;
- мікроконтролер STM32 або SoC з RTOS із флеш-пам'яттю і SD-картою;
- комунікації: LoRa + NB-IoT/GSM + USB для локального зв'язку;
- живлення: $\text{LiFePO}_4\ 12\text{ V}$ + MPPT-контролер для сонячної панелі;
- сенсори довкілля: терморезистор, датчик вологості, GPS для геоприв'язки даних;
- захист: TVS, газорозрядні розрядники на вході зовнішніх кабелів.

Тестування і приклади використання

Лабораторний стенд: ванна з сольовим розчином, еталонні значення провідності, перевірка на різних температурах і концентраціях.

Польове випробування: порівняння з комерційними системами ERT, вивчення впливу рослинності, сезонних змін вологості.

Метрики: похибка відносна $< 1\text{--}5\%$ для контрольованих умов; стабільність протягом 24–72 годин; час циклу вимірювання на одну конфігурацію $< 1\text{--}5\text{ c}$ (залежно від потреби).

7. Практичні приклади реалізації та технічні характеристики

Приклад 1. Система конструкції Олександра Броварця.

Одне з досліджень описує інформаційно-технічну систему локального оперативного моніторингу ґрунтового середовища для визначення електропровідних характеристик.

Особливості

Робота в ручному режимі або як агрегат на транспортному засобі.

Можливість встановлення на машину, що виконує технологічну операцію (сівба, внесення добрив).

Параметри корпусу: 100×100×50 мм, маса < 500 г, живлення через USB 5 В, споживання ≤ 2,5 Вт.

Використано 2- і 4-полюсні схеми вимірювання, можливість вибору між виводом напруги, опору, електропровідності.

Застосування GPS, запис координат для кожної точки вимірювання.

Згідно з публікацією, використання такої системи дало економічний ефект: +20-30% прибутку за рахунок оптимізації норм. journals.kntu.kherson.ua.

Приклад 2. Датчик «8-in-1» для ґрунту.

Інший приклад: сенсор, який вимірює вологість ґрунту, температуру, електропровідність, солоність та інші параметри.

Хоча це більше модуль для агрономічного моніторингу, ніж спеціалізована система вимірювання електропровідності, він демонструє комерційний підхід до багатопараметрового сенсора.

Порівняння апаратного забезпечення різних інформаційно-технічних систем для вимірювання величини параметрів електропровідності ґрунтового середовища (табл. 1).

Таблиця 1 — Порівняння апаратного забезпечення різних інформаційно-технічних систем промислової системи з комерційними мультисенсорами для вимірювання величини параметрів електропровідності ґрунтового середовища

Параметр	Промислова система (Броварець)	Комерційний мультисенсор
Призначення	Польове оперативне вимірювання електропровідності зі створенням карт	Сенсор для ґрунтового моніторингу (волога, pH, EC)
Інтеграція	З транспортними засобами, системою автоматичного внесення матеріалів	Стаціонарне або переносне використання
Масштаб	Великі площі поля, картографування	Локальне вимірювання
Гнучкість	Вибір режимів, масштабування	Простіше обладнання, менше конфігурацій

Ці приклади показують, як апаратне забезпечення може бути адаптоване під конкретні задачі — від ручних пристроїв до вбудованих систем на агромашинах.

Економічні та експлуатаційні аспекти

Комерційні рішення можуть бути дорогими через набір високоточних компонентів; модульна архітектура дозволяє кастомізацію під бюджет. Обслуговування: регулярна перевірка контактів, чистка електродів, оновлення ПЗ, тест акумуляторів.

Перспективи розвитку

Використання IoT-платформ для масштабного мережевого моніторингу ґрунтів (агротехніка, екологія). Інтеграція машинного навчання для інверсії та інтерпретації даних, адаптивне керування режимами вимірювань. Розвиток низькошумних компонентів та більш енергоефективних архітектур, застосування бездротових сенсорних мереж для розподіленого вимірювання.

8. Висновки

Апаратне забезпечення є фундаментальною складовою інформаційно-технічної системи для вимірювання електропровідності ґрунту. Воно охоплює сенсори/електроди, модулі обробки сигналу, комунікаційні системи, живлення та конструктивні рішення.

Для точного й оперативного моніторингу електропровідності ґрунту потрібно використовувати системний підхід, враховуючи всю лінію: від контакту з ґрунтом до передачі даних.

Правильний вибір джерела збудження, електродів, підсилювачів, АЦП та системи комутації визначає точність та надійність результатів. Для польових застосувань важливі енергоефективність, захист від впливів навколишнього середовища і зручність інтеграції з каналами передачі даних. Ретельне калібрування, застосування диференційних схем та охорони сигналу дозволяють звести до мінімуму системні похибки.

Вимірювання електропровідності в польових умовах має специфічні вимоги: контакт, стабільність, захист, калібрування, які повністю лежать у площині апаратного забезпечення.

Перспективи розвитку:

- подальша мініатюризація апаратури й інтеграція в безпілотні платформи (дрони, автономні трактори);
- розвиток безконтактних методів вимірювання електропровідності (індукційні сенсори), що зменшують контакт із ґрунтом;
- інтеграція з IoT-мережами і хмарною аналітикою для обробки великих масивів даних у реальному часі;
- вдосконалення алгоритмів компенсації впливу температури, вологості, типу ґрунту на результати вимірювання;
- створення стандартизованих модулів апаратного забезпечення, які можна легко адаптувати під різні агроумови.

Майбутній розвиток пов'язаний із впровадженням мережевого моніторингу, алгоритмів інверсії та автоматизацією процесу збору й обробки даних.

Завдяки впровадженню таких систем можливий перехід до більш точного землеробства (precision farming) та оптимізації витрат на добрива, внесення матеріалів.

Отже, інвестиція в якісне апаратне забезпечення — це не просто технічна задача, а стратегічний ресурс для підвищення ефективності моніторингу ґрунту, збереження ресурсів і зростання продуктивності.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. URL: <https://kppk.com.ua/ELLIB/ebook/Gorbenko/ICTEd/presentation/t%207.pptx>.
2. URL: <http://radnuk.info/pidrychnuku/inform/439-aristova/6209--iv---ii---41-----.html>.
3. URL: <https://naurok.com.ua/urok-aparatne-zabezpechennya-pk-periferiyni-pristro-vvedennya-vivedennya-informaci-135057.html>.
4. URL: <https://surl.li/qovarv>.
5. URL: <https://surl.li/iozzhz>.
6. URL: <https://surl.li/ihvwws>.
7. URL: <https://surl.li/ctfjpi>.
8. Федірець О.В., Броварець О.О., Мартин О.М. Інноваційне управління агропродовольчою сферою як соціально-економічною системою в умовах безпекових викликів. *Інвестиції: практика та досвід. Економічна наука*. 2024. № 8. С. 52–58.
9. Броварець О.О. Аналіз зон неоднорідності (варіабельності) стану сільськогосподарських угідь із використанням засобів моніторингу та розробка програмного забезпечення для його забезпечення. *Математичні машини і системи*. 2022. № 3. С. 85–99.
10. Броварець О.О. Розумні машини для розумних господарів. *Зерно*. 2016. № 9 (81). С. 262–266.

11. Броварець О.О. Від безплужного до глобального розумного землеробства. *Техніка і технології АПК*. 2016. № 9 (84). С. 19–23.
12. Броварець О.О. Від безплужного до глобального розумного землеробства. *Техніка і технології АПК*. 2016. № 10 (85). С. 28–30.
13. Адамчук В.В., Мойсеєнко В.К., Кравчук В.І., Войтюк Д.Г. Техніка для землеробства майбутнього. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха: ННЦ «ІМЕСГ», 2002. Вип. 86. С. 20–32.
14. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки / За ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалю. К.: Аграрна наука, 2004. 398 с.
15. Мироненко В.Г., Броварець О.О. Інтегровані системи автоматичного управління технологічними процесами у рослинництві. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. К., 2015. Ч. 1, Вип. 212. С. 62–71.

Стаття надійшла до редакції 15.10.2025