

КРОПИВ'ЯНСЬКИЙ ЄВГЕН

Вінницький національний технічний університет

e-mail: machete325@gmail.com**САВИЦЬКИЙ АНТОН**

Вінницький національний технічний університет

e-mail: savitskyant@gmail.com

ТЕХНОЛОГІЇ ТА МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КИСЛОТНОСТІ ҐРУНТУ

У статті представлено огляд сучасних технологій вимірювання рН ґрунту, зокрема традиційних лабораторних методів, електрохімічних, оптичних, наносенсорів та твердотільних сенсорів. Проаналізовано принципи їх роботи, переваги та обмеження, а також розглянуто перспективи розвитку методів моніторингу рН ґрунту. Особлива увага приділена ролі точного визначення рН у забезпеченні оптимального розвитку рослинництва та екологічного моніторингу ґрунтів, що є критичним у контексті зміни клімату та сталого управління земельними ресурсами.

Ключові слова: Моніторинг ґрунту, вимірювання рН ґрунту, електрохімічні сенсори, оптичні сенсори, нанотехнології, точне землеробство, екологічний контроль.

KROPYVIANSKYI YEVHENII, SAVITSKY ANTON

Vinnytsia National Technical University

TECHNOLOGIES AND METHODS FOR MEASURING SOIL ACIDITY

Soil acidity monitoring is a key aspect of modern agriculture, as pH levels significantly influence soil fertility, nutrient availability, and the overall health of ecosystems. Maintaining an optimal pH balance is essential for improving crop yields, ensuring efficient fertilizer absorption, and preventing soil degradation. Traditional laboratory methods for measuring soil acidity provide high accuracy but require considerable time and specific conditions, making them less suitable for real-time monitoring in large-scale agricultural applications. The growing need for automated and continuous soil monitoring has led to the development of various sensor-based technologies. This paper reviews modern methods for measuring soil pH, including traditional laboratory analysis, electrochemical sensors, optical sensors, nanotechnology-based approaches, and solid-state ISFET sensors. Each method's working principles, structural design, and operational characteristics are analyzed and compared. While electrochemical and optical sensors offer faster measurements than laboratory methods, they are often influenced by environmental factors such as moisture content and temperature. Nanotechnology-based sensors provide extremely high sensitivity and precision but remain costly and require further research for large-scale agricultural implementation. A comparative calculation of the sensitivity of soil acidity measurement methods was performed, demonstrating that traditional laboratory methods achieve an accuracy of ± 0.1 pH, while solid-state ISFET sensors offer improved accuracy at ± 0.01 pH. The study highlights the advantages and limitations of each approach and justifies the selection of the ISFET-based sensor for further development. This choice is driven by its ability to deliver high accuracy, rapid response times, and seamless integration into wireless soil monitoring systems, making it an optimal solution for precision agriculture.

Keywords: Soil monitoring, soil pH measurement, electrochemical sensors, optical sensors, nanotechnology, precision agriculture, environmental control.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Вступ

Кислотність ґрунту є важливим фактором, що впливає на родючість, розвиток рослин та стан екосистем, визначаючи розчинність поживних речовин і активність мікроорганізмів. Традиційні методи вимірювання рН забезпечують високу точність, але потребують значних витрат часу та спеціальних умов. Сучасне сільське господарство вимагає оперативного моніторингу ґрунтових параметрів у польових умовах, що сприяло розвитку сенсорних технологій для вимірювання рН. Точне землеробство використовує сенсорний аналіз та інформаційні технології для підвищення ефективності, оптимізації ресурсів та поліпшення якості ґрунту. Однією з головних проблем є швидке та доступне визначення кислотності ґрунту, що стало можливим завдяки розвитку новітніх сенсорних систем для реального моніторингу рН [1]

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток сучасних технологій вимірювання кислотності ґрунту є важливим напрямом у сфері точного землеробства, оскільки рівень рН впливає на родючість, засвоєння поживних речовин і стан екосистем. Сучасні дослідження спрямовані на вдосконалення методів вимірювання рН, підвищення їхньої точності, швидкодії та можливості інтеграції в автоматизовані системи моніторингу. Аналіз останніх публікацій показує, що традиційні лабораторні методи, хоча і забезпечують високу точність, є трудомісткими та малоприматними для оперативного контролю великих площ. Електрохімічні сенсори, зокрема скляні рН-електроди, широко використовуються в аграрній сфері, але вони вимагають частого калібрування та чутливі до змін вологості ґрунту. Оптичні сенсори дозволяють дистанційне вимірювання, проте їх точність може залежати від органічних домішок у ґрунті. Найперспективнішими є твердотільні ISFET-сенсори, які поєднують високу точність, швидкий відгук та можливість бездротової передачі даних. Вони можуть бути інтегровані у сучасні системи точного землеробства,

що дозволяє здійснювати моніторинг рН ґрунту в режимі реального часу. Проведені дослідження підтверджують їхню стабільність, довговічність та адаптивність до різних умов.

Отже, аналіз існуючих технологій показує, що подальші дослідження є актуальними та повинні бути зосереджені на покращенні характеристик сенсорів, зниженні їх вартості та розширенні можливостей інтеграції в інтелектуальні аграрні системи.

Теоретичні та експериментальні дослідження

Мета дослідження: аналіз сучасних методів і технологій вимірювання кислотності ґрунту, їх порівняння за точністю, стабільністю та можливістю інтеграції в автоматизовані системи моніторингу. Особлива увага приділяється оцінці переваг і недоліків традиційних лабораторних методів, електрохімічних, оптичних, нанотехнологічних та твердотільних ISFET-сенсорів. На основі проведеного аналізу та розрахунків точності визначається найбільш ефективний метод для подальшої розробки сенсора кислотності ґрунту, придатного для використання в системах точного землеробства.

Технології та методи вимірювання кислотності ґрунту

Швидкість хімічних реакцій та розчинність речовин у ґрунті безпосередньо залежать від рівня рН. Вимірювання рН є важливим фактором для розуміння хімічних і біологічних процесів у ґрунті. Ріст і врожайність більшості культур знижуються за низьких значень рН та підвищуються при наближенні до оптимального рівня. Більшість сільськогосподарських культур найкраще розвиваються в нейтральному середовищі (рН 6–7,5), хоча деякі види надають перевагу кислим або лужним ґрунтам. На рис. 1. представлено вплив кислотності на доступність поживних речовин.

З математичної точки зору рН ґрунту визначається як від'ємний десятковий логарифм концентрації іонів водню (H^+) у розчині. Зі збільшенням кислотності ґрунту рівень рН знижується. ґрунти з рН нижче 7 називають кислими, з рН вище 7 – лужними, а нейтральними вважаються ті, що мають значення рН 7. У кислих ґрунтах спостерігається нестача кальцію (Ca), магнію (Mg), нітратного азоту (NO_3-N), фосфору (P), бору (B) та молібдену (Mb), тоді як алюміній (Al) та марганець (Mn) містяться у надлишку. Натомість у сильно лужних ґрунтах часто бракує фосфору (P), заліза (Fe), міді (Cu), цинку (Z) та бору (B) [2].

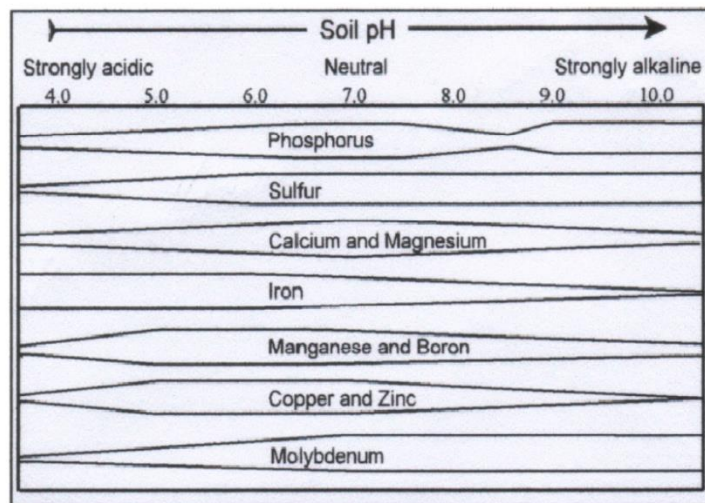


Рис. 1. Вплив рН ґрунту на доступність поживних речовин

Найпоширенішим способом вимірювання рН ґрунту це традиційні лабораторні методи, які включають в себе відбір проб ґрунту та їх подальший аналіз у спеціалізованих лабораторіях. Одним із основних інструментів для вимірювання є рН-метри, які визначають кислотність ґрунту через вимірювання електричного потенціалу між електродами, що контактують з ґрунтовими розчинами. Колориметричні тести також є поширеним методом, коли зміни кольору виявленого індикатора дозволяють визначити рівень рН. Ці методи забезпечують високу точність і надійність, проте вони потребують значного часу для підготовки зразків і проведення вимірів, а також не підходять для швидкого моніторингу великих територій.

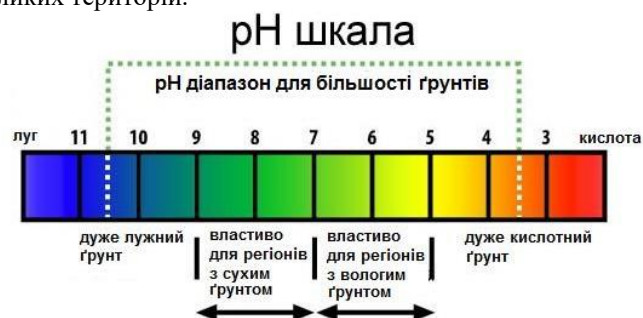


Рис. 2. Колірна шкала для визначення рН ґрунту

Електрохімічні сенсори: Електрохімічні сенсори є популярними завдяки своїй здатності до безпосереднього вимірювання рН ґрунту з високою точністю. Іон-селективні електроди (ISE) та скляні рН-електроди вимірюють зміни електричного потенціалу, які виникають через активність іонів водню в розчині. Такі сенсори можуть забезпечити точні результати за короткий час, однак вони потребують регулярного калібрування для збереження точності вимірювань. Крім того, вологість ґрунту може впливати на результат, тому необхідно враховувати умови навколишнього середовища при проведенні вимірів. Електрохімічний метод визначення кислотності базується на пропорційній залежності між електрорушійною силою та активністю іонів у розчині [3, 4]. У загальному випадку електрорушійна сила електрохімічної комірки, що складається з двох електродів, занурених у розчин електроліту (як показано на рисунку 3), визначається рівнянням:

$$E = E_K - E_A, \quad (1)$$

де E_K та E_A – потенціали катода і анода відповідно, що, згідно з рівнянням Нернста, пов'язані з активністю іонів в розчині.

Отже, електрохімічний метод вимірювання рН ґрунту передбачає визначення електрорушійної сили комірки, що складається з індикаторного (вимірювального) електрода та електрода порівняння. Потенціал індикаторного електрода змінюється відповідно до концентрації іонів водню в розчині, тоді як потенціал електрода порівняння залишається сталим і слугує еталонним значенням для вимірювань.

Найбільш поширеним серед індикаторних електродів є скляний електрод, чутливий до концентрації іонів H^+ , а як електрод порівняння зазвичай використовується хлорсрібний електрод.

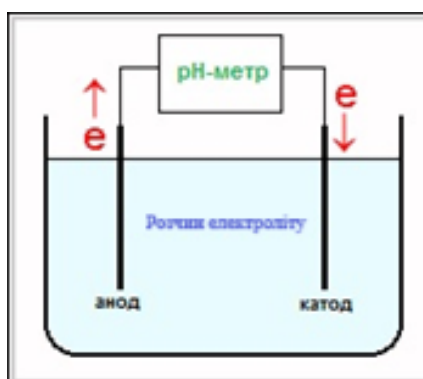


Рис. 3. Принцип роботи електрохімічного методу вимірювання рН ґрунту

Скляний електрод має низку беззаперечних переваг, зокрема стабільність характеристик, здатність функціонувати в широкому діапазоні рН і температур, високу швидкість та стійкість до окислення. Проте для коректної роботи його необхідно зберігати у спеціальних буферних розчинах, ретельно промивати дистильованою водою після кожного використання та проводити калібрування перед початком вимірювань [5].

Оптичні сенсори: Оптичні сенсори вимірюють рН на основі змін у кольорі рН-чутливих барвників, які використовуються для створення оптичних матеріалів. Волоконно-оптичні сенсори і спектрофотометричні методи дозволяють здійснювати безконтактний моніторинг рН ґрунту. Це особливо корисно для дистанційного вимірювання та моніторингу великих територій, де інші методи можуть бути менш ефективними. Однак оптичні сенсори мають обмеження, зокрема через можливий вплив органічних сполук у ґрунті, які можуть змінювати спектр відображення і впливати на точність вимірювань. Такі сенсори здійснюють оцінку параметрів опосередковано, аналізуючи відбиття світла в різних спектральних діапазонах та визначаючи вміст хлорофілу в рослинах. Це дає змогу розраховувати вегетаційні індекси, зокрема індекс біомаси. Оскільки здорові рослини з добре розвинутою структурою під час фотосинтезу поглинають більше світла в червоному та синьому діапазонах, а відбивають переважно зелений спектр, ця властивість стала основою принципу роботи оптичних сенсорів.

Для коректного функціонування цих сенсорів необхідне джерело світла. Пасивні системи використовують природне сонячне освітлення, тоді як активні працюють із штучними джерелами, такими як світлодіодні або ксенонові лампи. Обидві технології мають свої переваги й недоліки: пасивні сенсори можуть застосовуватися лише в світлий час доби, тоді як активні працюють як удень, так і вночі. Водночас точність вимірювань активних сенсорів суттєво залежить від відстані між джерелом світла та рослинами, що не завжди можливо оптимально налаштувати в польових умовах.

Одним із прикладів оптичних сенсорів є система WeedSeeker. Ці сенсори монтуються безпосередньо на кожну форсунку обприскувача та під час руху автоматично здійснюють безперервне сканування рослинного покриву. У разі виявлення бур'янів комп'ютерна система подає сигнал для розпилення робочого розчину саме на ті ділянки, де було зафіксовано небажану рослинність. Це забезпечує точне нанесення гербіцидів без зайвих витрат, що особливо ефективно при використанні препаратів контактної дії, дозволяючи суттєво зменшити витрати хімікатів [6].

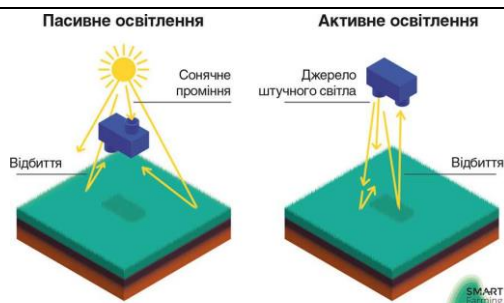


Рис. 4. Принцип роботи оптичних сенсорів вимірювання pH ґрунту



Рис. 5. Встановлені на штанзі сенсори WeedSeeker регулюють подачу робочого розчину на форсунки, під якими знаходиться бур'ян

Наносенсори. Завдяки розвитку нанотехнологій з'явилися нові покоління сенсорів, які використовують наноматеріали, такі як вуглецеві нанотрубки і графен. Ці сенсори мають надзвичайно високу чутливість і швидкий час відгуку, що дозволяє використовувати їх для моніторингу змін pH в аграрних системах у реальному часі. Крім того, вони відрізняються високою стабільністю і здатністю до інтеграції в інтелектуальні аграрні системи, що дозволяє автоматизувати процеси моніторингу та знижує потребу в частій перевірці. Водночас використання нанотехнологій потребує значних фінансових вкладень та є предметом подальших досліджень щодо довговічності і впливу на навколишнє середовище.

Одним із прикладів таких датчиків є графеновий датчик вимірювання кислотності. Датчик складається з кількох основних компонентів. Його підкладкою є кремнієва пластина (Si) з шаром оксиду кремнію (SiO_2) товщиною 285 нм, який виконує ізоляційну функцію та забезпечує стабільність роботи. Чутливим елементом виступає графен, отриманий методом механічної ексfolіації та нанесений на підкладку. Він діє як резистивний елемент, чий опір змінюється залежно від концентрації іонів водню в розчині. Контактні електроди виготовлені з платини (Pt) за допомогою технології фокусованого іонного пучка (FIB - Focused Ion Beam). Для покращення електричного контакту поверх них наноситься шар срібної фарби, а подальший відпал електродів допомагає знизити контактний опір. Під час роботи датчик занурюється у водний розчин із різним рівнем кислотності (pH 4-10). Іони водню (H^+) взаємодіють із графеном, змінюючи його поверхневий заряд, що впливає на концентрацію носіїв заряду та змінює електропровідність матеріалу. Вимірювання змін опору між електродами дозволяє визначити рівень pH розчину [7].

Характеристики датчика:

Діапазон вимірювання: pH 4-10.

Чутливість: $\approx 2 \text{ к}\Omega/\text{pH}$ (зміна опору на одиницю pH).

Роздільна здатність: 0,3 pH в лужному середовищі.

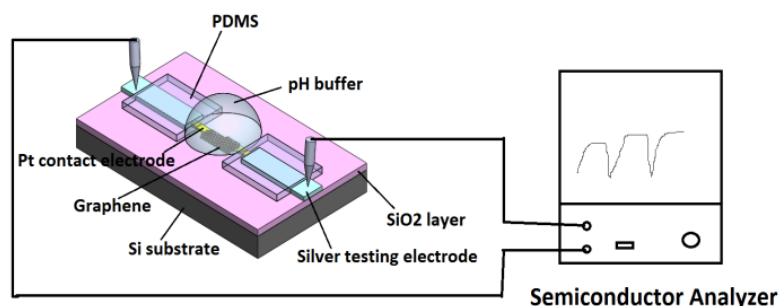


Рис. 6. Конструкція графенового датчика вимірювання кислотності ґрунту

Твердотільні сенсори (ISFET): Твердотільні pH-сенсори на основі ISFET використовують транзистори, чутливі до іонів водню, для вимірювання pH ґрунту. Вони забезпечують швидке та точне вимірювання без рідких електролітів або скляних електродів. Завдяки високій чутливості та довговічності, ці сенсори підходять для інтеграції в сучасні аграрні системи моніторингу. Вони також працюють при різних температурах та можуть бути використані для бездротового моніторингу в реальному часі. Однак можуть залежати від умов навколишнього середовища, зокрема температури та вологості, для підтримки точності.

Прикладом є датчик на основі іон-селективного польового транзистора (ISFET), який є модифікацією звичайного польового транзистора, де металевий затвор замінено іон-чутливою мембраною, вимірюваним розчином і референтним електродом. На відміну від скляних pH-електродів, де чутлива колба заповнена буферним розчином, технологія ISFET дозволяє створити твердотільний сенсор кислотності. Уся мікросхема вбудована у пластиковий корпус, залишаючи відкритою лише поверхню затвора для контакту з розчином. Це забезпечує високу міцність і виключає необхідність використання скла. Принцип роботи ISFET заснований на керуванні струмом між двома напівпровідниковими електродами – виток (source) і сток (drain), які розташовані на кремнієвій підкладці. Між ними знаходиться затвор (gate), який є безпосередньо чутливим до іонного складу розчину. Хімічний шар затвора, що взаємодіє з іонами водню, виготовлений з матеріалів, таких як оксид кремнію (SiO_2), нітрид кремнію (Si_3N_4) або оксид алюмінію (Al_2O_3). Коли pH розчину змінюється, кількість іонів H^+ на поверхні чутливого шару змінюється, що створює електричне поле. Це поле впливає на струм між витком і стоком. Для підтримки постійного струму через транзистор необхідно прикласти контрольну напругу через референтний електрод. Зміна цієї контрольної напруги пропорційна рівню pH розчину, що дозволяє точно визначати кислотність середовища [8].

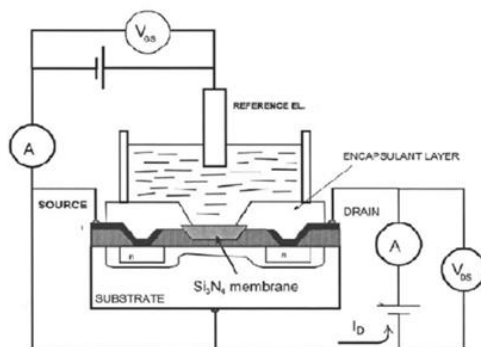


Рис. 7. Електронна схема ISFET датчика вимірювання pH ґрунту та принцип його роботи

Таблиця 1

Основні характеристики методів вимірювання кислотності ґрунту

Метод	Точність	Час вимірювання	Вплив зовнішніх факторів	Додаткові особливості
Традиційні лабораторні методи	Висока (± 0.01 – 0.1 pH)	Довгий (години/дні)	Мінімальний, але вимагає стабільних умов	Надійний, підходить для детального аналізу
Електрохімічні сенсори (ISE, скляні електроди)	Висока (± 0.01 – 0.1 pH)	Швидкий (секунди/хвилини)	Вплив вологості та температури ґрунту	Потребує регулярного калібрування
Оптичні сенсори	Середня (± 0.1 – 0.2 pH)	Швидкий (секунди/хвилини)	Чутливість до органічних речовин	Безконтактний, придатний для дистанційного моніторингу
Наносенсори	Дуже висока (± 0.001 – 0.01 pH)	Дуже швидкий (миттєвий/секунди)	Мінімальний вплив зовнішніх умов	Висока чутливість, інтеграція в «розумні» аграрні системи, дороговартісні
Твердотільні pH-сенсори (ISFET)	Висока (± 0.01 – 0.1 pH)	Дуже швидкий (миттєвий/секунди)	Вплив температури та електричних умов	Не потребують калібрування, висока стабільність та чутливість

Таблиця 2

Переваги та недоліки методів вимірювання кислотності ґрунту

Метод	Переваги	Недоліки
Традиційні лабораторні методи	Висока точність, надійність, можливість комплексного аналізу	Тривалий процес аналізу, необхідність відбору проб, не підходить для безперервного моніторингу
Електрохімічні сенсори (ISE, скляні електроди)	Висока точність, швидкість вимірювання, можливість безперервного моніторингу	Вимагають регулярного калібрування, залежать від вологості ґрунту
Оптичні сенсори	Безконтактний метод, швидкість вимірювання, можливість дистанційного моніторингу	Менша точність через вплив органічних речовин у ґрунті, залежність від навколишнього освітлення
Наносенсори	Надзвичайно висока чутливість, швидкість вимірювання, стабільність, можливість інтеграції у бездротові системи	Висока вартість, потреба у подальших дослідженнях довговічності
Твердотільні pH-сенсори (ISFET)	Швидкість вимірювання, довговічність, не потребують калібрування	Чутливість до температури, вплив електричних умов

Однією з ключових характеристик pH-сенсорів є їхня чутливість до зміни концентрації іонів водню. Вона визначається рівнянням Нернста:

$$\Delta V_{GS} = \frac{2.3RT}{F} \Delta pH, \quad (2)$$

де $R = 8.314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$ — універсальна газова стала, T — температура у Кельвінах, $F = 96485 \text{ Кл/моль}$ — стала Фарадея.

За стандартної температури 25°C (298 K), чутливість ISFET становить приблизно:

$$\Delta V_{GS} = \frac{2.3 \cdot 8.314 \cdot 298}{96485} \Delta pH = 59.16 \cdot \Delta pH$$

Щоб оцінити переваги ISFET у порівнянні зі скляним електродом, розглянемо їхні типові похибки:

- Скляний електрод: $\pm 0.1 \text{ pH}$
 - ISFET: $\pm 0.01 \text{ pH}$
- Припустимо, що реальне значення pH ґрунту дорівнює 6.2. Тоді:
- Скляний електрод може показати значення у діапазоні 6.1 – 6.3
 - ISFET забезпечить точність у межах 6.19 – 6.21

Розрахунок похибки у напрузі

Для скляного електрода:

$$\Delta V_{GS} = 59.16 \cdot 0.1 = 5.916 \text{ мВ}$$

Для ISFET:

$$\Delta V_{GS} = 59.16 \cdot 0.01 = 0.5916 \text{ мВ}$$

Таким чином, ISFET забезпечує у 10 разів кращу точність, що є критично важливим для точного землеробства та систем автоматизованого моніторингу ґрунту.

У традиційних агротехнологіях найпоширенішими залишаються лабораторні методи та електрохімічні сенсори. Однак оптичні, нанотехнологічні та твердотільні сенсори активно впроваджуються в сучасні системи точного землеробства завдяки їхнім перевагам. Після розгляду різних методів, було обрано твердотільний pH-сенсор (ISFET), оскільки він має високу довговічність, чутливість, швидкість реакції та стабільність, а також можливість бездротової інтеграції, що робить його перспективним рішенням для точного контролю кислотності та вологості ґрунту [9].

Висновки

У статті було розглянуто різноманітні технології вимірювання кислотності ґрунту, серед яких традиційні лабораторні методи, електрохімічні, оптичні, наносенсори та твердотільні сенсори. Описано їхні основні характеристики, переваги та недоліки. На основі аналізу було визначено, що твердотільний pH-сенсор (ISFET) демонструє оптимальні характеристики для точного моніторингу кислотності ґрунту, зокрема завдяки його довговічності, швидкодії та стабільності вимірювань. Було проведено розрахунок чутливості та точності ISFET у порівнянні зі скляними електродами. Отримані значення показали, що похибка у вимірюванні напруги для скляного електрода становить 5.916 мВ, тоді як для ISFET — лише 0.5916 мВ, що підтвердило його значну перевагу у десятикратному зниженні похибки

вимірювань. Важливим аспектом залишається температурна компенсація в польових умовах, оскільки чутливість сенсора залежить від температури середовища. Тому перспективним напрямком розвитку ISFET сенсорів є розробка та дослідження апарато-програмних засобів корекції дрейфу температури на результат вимірювання. Це може бути реалізовано шляхом автоматизованих алгоритмів корекції або використанням додаткових сенсорів температури для точнішого вимірювання pH у реальних умовах експлуатації.

Література

1. Arousian, A., Gill, E., Arshak, K., Korostynska, O., & Cuniffe, C. (2007). Drop-Coated Polyaniline Composite Conductimetric pH Sensors. ISSE2007.
2. Khan, M. I., Khan, A. M., Nouman, A., Azhar, M. I., & Saleem, M. K. (2012). pH Sensing Materials for MEMS Sensors and Detection Techniques. International Conference on Solid-State and Integrated Circuit, 32, 18-22.
3. Thomas, J. D. R. (2001). Devices for Ion Sensing and pH Measurements. Pure and Applied Chemistry, 73(1), 31-38.
4. Bergveld, P. (1970). Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Neurophysiological Measurements. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BM17(1), 70.
5. Вимірювання кислотності ґрунту [Електронний ресурс]. Режим доступу <https://simvolt.ua/priladi-dlya-vimiruvannya-kislotsnosti-gruntu/?srsltid=AfmBOoo1t2b-WPdnQx7hV7IGjXv5YnDyTX8gkbLSVrxwt8iHywkwpc2K>
6. Як оптичні сенсори економлять 33Р і добрива [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.agronom.com.ua/yak-optychni-sensory-ekonomlyat-zzr-i-dobryva/>
7. N. Lei, P. Li, W. Xue, and J. Xu, Simple graphene chemiresistors as pH sensors: Fabrication and characterization. Measurement Science and Technology, 2011. 22(10): p. 107002
8. Soil pH Sensing Techniques and Technologies – A Review [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.researchgate.net/profile/Manish-Kumar-787/publication/276145904_Soil_pH_Sensing_Techniques_and_Technologies_-_A_Review/links/55517f5908ae739bdb921d25/Soil-pH-Sensing-Techniques-and-Technologies-A-Review.pdf?_cf_chl_tk=Z5K5tvm49F196fnfZXCwyFvBYfhtoSJfFtBSPRA27yM-1739877312-1.0.1.1-n0FqlDuah7mWjGNN5g37BJ2QpHfpi..gkwrjO9F.Py8
9. Eftekhari, A. (2003). pH Sensor Based on Deposited Film of Lead Oxide on Aluminium Substrate Electrode. Sensors and Actuators B: Chemical, 88(3), 234-238.

References

1. Arousian, A., Gill, E., Arshak, K., Korostynska, O., & Cuniffe, C. (2007). Drop-Coated Polyaniline Composite Conductimetric pH Sensors. ISSE2007.
2. Khan, M.I., Khan, A.M., Nouman, A., Azhar, M.I., & Saleem, M.K. (2012). pH Sensing Materials for MEMS Sensors and Detection Techniques. International Conference on Solid-State and Integrated Circuits, 32, 18-22.
3. Thomas, J.D.R. (2001). Devices for Ion Sensing and pH Measurements. Pure and Applied Chemistry, 73(1), 31-38.
4. Bergveld, P. (1970). Development of an Ion-Sensitive Solid-State Device for Neurophysiological Measurements. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, BM17(1), 70.
5. Measuring Soil Acidity [Electronic resource]. Access mode: <https://simvolt.ua/priladi-dlya-vimiruvannya-kislotsnosti-gruntu/?srsltid=AfmBOooT6zYq4FcGxAOFIGSN7LUrdA1lcnzZwfH1RRekYGwRc3MUIXSs>
6. How optical sensors save on pesticides and fertilizers [Electronic resource]. Access mode: <https://www.agronom.com.ua/yak-optychni-sensory-ekonomlyat-zzr-i-dobryva/>
7. N. Lei, P. Li, W. Xue, and J. Xu, Simple graphene chemiresistors as pH sensors: Fabrication and characterization. Measurement Science and Technology, 2011. 22(10): p.
8. Soil pH Sensing Techniques and Technologies – A Review [Electronic resource]. Access mode: https://www.researchgate.net/profile/Manish-Kumar-787/publication/276145904_Soil_pH_Sensing_Techniques_and_Technologies_A_Review/links/55517f5908ae739bdb921d25/Soil-pH-Sensing-Techniques-and-Technologies-A-Review.pdf?__cf_chl_tk=Z5K5tvm49F196fnfZXCwyFvBYfhtoSJfFtBSPRA27yM-1739877312
9. 107002 Eftekhari, A. (2003). pH Sensor Based on Deposited Film of Lead Oxide on Aluminum Substrate Electrode. Sensors and Actuators B: Chemical, 88(3), 234-238.