



В. В. Жуковський, С. В. Шатний, Н. А. Жуковська, А. В. Шатна

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

ВИМІРЮВАЛЬНО-АНАЛІТИЧНІ ЗАСОБИ ІОТ-МОНІТОРИНГУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТІВ

Ефективне управління водним режимом ґрунтів є одним із ключових завдань сучасного агровиробництва, особливо в умовах точного та органічного землеробства, яке потребує точного контролю за зволоженням без шкоди для екологічної рівноваги. Досягнення цієї мети можливе за умови застосування високоточних вимірювально-аналітичних засобів, здатних функціонувати в автономному режимі в реальних польових умовах. У межах цього дослідження розроблено апаратно-програмний комплекс моніторингу вологості ґрунтів, до складу якого входять гідроелектричний пристрій для експрес-аналізу якості ґрунтів, сенсори тиску та електропровідності, а також мікропроцесорна система керування з підтримкою бездротової передачі даних. Запропоновано архітектуру локальної системи моніторингу, адаптовану до умов керованих модулів осушувально-зволожувальних систем. Така система забезпечує безперервне збирання і передавання даних про рівень вологості, електропровідність і склад відпрацьованої вологи у ґрунті. Наведено математичну модель перехідних процесів насичення та осушення ґрунтів із використанням лінеаризованого рівняння Буссінеска. Реалізовано методику розрахунку вмісту вологи за показами тензіометрів із врахуванням фізико-механічних властивостей ґрунтів різного складу. Побудовано обчислювальні моделі в середовищі Matlab, які дають змогу відтворювати характерні перехідні процеси у ґрунтового середовищі та можуть бути використані для удосконалення алгоритмів керування зволоженням у режимі реального часу. Для розробленого вимірювального пристрою характерні низька інерційність, висока точність та можливість автономної роботи. Його конструкція дає змогу ефективно адаптуватися до різних типів ґрунтів і кліматичних умов. Важливою перевагою такого пристрою є можливість його інтеграції в масштабовану інформаційно-аналітичну IoT-платформу TankToad, яка забезпечує централізований моніторинг, оброблення та зберігання телеметричних даних від великої кількості пристроїв. Подані в роботі результати підтверджують доцільність запропонованого технічного рішення та можуть бути використані для створення адаптивних цифрових систем управління водним режимом ґрунтів у сталому землеробстві.

Ключові слова: інформаційна технологія; апаратно-програмне забезпечення; система керування; цифрові агротехнології; телеметрія; польові вимірювання.

Вступ / Introduction

У світовій науковій літературі активно досліджують питання цифрового моніторингу аграрних ресурсів, зокрема – стану ґрунтів як одного з ключових факторів сталого землеробства. Розробляють програмно-апаратні рішення, що забезпечують дистанційний контроль вологості, температури, кислотності ґрунтів із використанням IoT-технологій, супутникової аналітики та машинного навчання. У таких країнах, як США, Нідерланди, Японія та Ізраїль, реалізовано низку проєктів із впровадження точного землеробства, однак більшість наявних рішень орієнтовані на великі агропромислові комплекси, мають високу вартість та обмежену адаптацію до умов органічного виробництва в розосереджених регіонах.

Недостатньо дослідженою залишається проблема розроблення доступних, автономних і точних засобів вимі-

рювання вологості ґрунтів, здатних функціонувати у складних польових умовах і бути інтегрованими до масштабованих інформаційно-аналітичних систем. Саме ця потреба зумовлює актуальність дослідження, спрямованого на створення спеціалізованих IoT-рішень для органічного землеробства та локальних меліоративних систем.

Об'єкт дослідження – контроль водного режиму ґрунтів в умовах осушувально-зволожувальних систем.

Предмет дослідження – методи і засоби моніторингу вологості ґрунтів, здатних функціонувати у складних польових умовах і бути інтегрованими до масштабованих інформаційно-аналітичних систем.

Мета роботи – розробити систему моніторингу вологості ґрунтів з використанням спеціалізованих вимірювальних пристроїв і комп'ютерного моделювання в режимі водонасичення чи осушення, що дасть змогу

Інформація про авторів:

Жуковський Віктор Володимирович, канд. техн. наук, доцент, кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики.

Email: v.v.zhukovskyy@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-7088-6930>

Шатний Сергій В'ячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра обчислювальної техніки. Email: serhii.shatnyi@gmail.com;

<https://orcid.org/0000-0003-4650-5090>

Жуковська Наталія Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент, кафедра комп'ютерних наук та прикладної математики.

Email: n.v.zhukovska@nuwm.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0001-7839-0684>

Шатна Анастасія Володимирівна, аспірант, кафедра обчислювальної техніки. Email: a.v.shatna@nuwm.edu.ua;

<https://orcid.org/0009-0006-2499-8591>

Цитування за ДСТУ: Жуковський В. В., Шатний С. В., Жуковська Н. А., Шатна А. В. Вимірювально-аналітичні засоби IoT-моніторингу вологості ґрунтів. Науковий вісник НЛТУ України. 2025, т. 35, № 4. С. 115–122.

Citation APA: Zhukovskyy, V. V., Shatnyi, S. V., Zhukovska, N. A., & Shatna, A. V. (2025). IoT-based measuring and analytical tools for soil moisture monitoring. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 115–122. <https://doi.org/10.36930/40350413>

здійснювати комплексне визначення його вологості, електропровідності та складу відпрацьованої води безпосередньо в польових умовах.

Для досягнення зазначеної мети визначено такі основні завдання дослідження:

- спроектувати гідроелектричний пристрій експрес-аналізу якості ґрунту, який дасть змогу здійснювати комплексне визначення вологості ґрунтів, електропровідності та складу відпрацьованої води безпосередньо в польових умовах;
- розробити методику розрахунку вологості за показами тензіометрів з урахуванням механічного складу ґрунтів, що дає змогу використовувати ці дані для чисельного моделювання режимів зволоження та підвищення точності прогнозування водного балансу;
- побудувати математичні моделі зміни рівня ґрунтових вод у режимах подачі й відведення води, що дає змогу поєднати вимірювальні дані з алгоритмами адаптивного управління водним режимом у межах IoT-системи;
- апробувати роботи пристроїв у складі інформаційно-аналітичної IoT-системи TankToad, що підтверджує їхню сумісність із масштабованими телеметричними платформами та ефективність інтеграції в цифрові системи агромоніторингу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тензіометри – це прилади для вимірювання матричного потенціалу води у ґрунті (напруги, з якою ґрунт утримує воду) через вакууметричний тиск [1]. У минулому вони потребували ручного зняття показів, але сучасні системи автоматизують цей процес. Науковці розробили недорогий IoT-тензіометр для безперервного моніторингу вологості на фермерських полях. Прототип оснащено сенсором тиску BMP180 (мембранний барометричний датчик) замість стандартного манометра та під'єднано до мікроконтролера ESP32. Такий датчик вимірює вакуум до -80 кПа з високою точністю ($R^2 = 0,99$ порівняно з механічним манометром). В інших країнах також з'являються подібні рішення: наприклад, у США експериментально порівнювали зрошення за даними IoT-тензіометрів із традиційним розрахунком за погодними даними і досягли 36 % економії води без втрати врожаю [2]. Це підтверджує, що тензіометри в IoT є перспективними для прецизійного зрошення.

Найпоширеніші датчики вологості в IoT-системах – це ті, що вимірюють діелектричну проникність ґрунту, оскільки вона істотно залежить від вмісту води [6]. До них належать ємнісні (FDR) датчики різних конструкцій та часово-імпульсні (TDR/TDT) зонди. У багатьох країнах дослідники зосередились на розробленні недорогих ємнісних сенсорів поєднано з Arduino/ESP-плат-

формами [3, 21]. Хоча ємнісні датчики привабливі низькою ціною, вони потребують ретельного калібрування під конкретний ґрунт для досягнення прийнятної точності [9]. У солонцюватих або кам'янистих ґрунтах їх покази можуть спотворюватися. Тому здійснюють пошуки нових методів.

Системи на підставі TDR (англ. *Time Domain Reflectometry* – метод відбиття імпульсів у часовій області) визнано золотим стандартом вимірювання вологості ґрунту через його високу точність (похибка $\sim 2-3$ %) [6]. Однак комерційні TDR-прилади дуже дорогі, що обмежує їх широке застосування. У 2025 р. італійські науковці представили низьковартісний компактний TDR-пристрій, спеціально спроектований для агрономічних застосувань. Ними проведено серію лабораторних калібрувань на ґрунтах різної текстури; за результатами дослідження новий прилад забезпечує можливість оцінювання вологості ґрунтів із $R^2 \approx 0,95$. Цей пристрій складається із власне TDR-генератора/реєстратора, зонда (коаксіального кабелю або хвилеводу) та мікроконтролера для оброблення сигналу і потенційно може бути інтегрований у IoT-вузол. Автори наголошують, що їх розроблення усуває "вузьке місце" вартості TDR, роблячи точні вимірювання доступнішими.

Попри досягнення в IoT-вимірюваннях вологості, більшість розробок залишаються лабораторними або обмеженими за функціональністю. Для органічного землеробства актуальними є автономні багатофункціональні пристрої, здатні працювати в польових умовах й інтегруватись у сучасні IoT-системи. Така потреба зумовила створення поданого в цій роботі апаратно-програмного рішення для ефективного моніторингу водного режиму ґрунтів.

Результати дослідження та їх обговорення / Research results and their discussion

Проектування пристроїв вимірювання параметрів та моніторингу стану ґрунтів. У дослідженні подано систему моніторингу технологічних параметрів на керованих модулях осушувально-зволожувальних комплексів і систем органічного землеробства (рис. 1), яка забезпечує контроль за рівнем ґрунтових вод (РГВ) та вологістю ґрунту. Як показано на цьому рисунку, специфіка експлуатації меліоративних систем, зокрема – значна розосередженість, сезонне оброблення ґрунту, вирощування різних культур на окремих модулях, зумовлює доцільність застосування бездротових технологій зв'язку [11, 18].

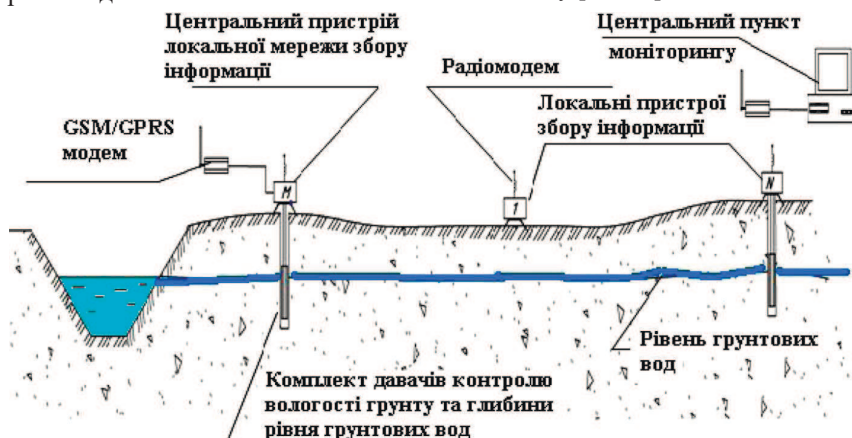


Рис. 1. Схема моніторингу технологічних параметрів на керованих модулях меліоративних систем і систем органічного землеробства / Monitoring scheme of technological parameters in controlled modules of drainage-irrigation systems and organic farming systems

Для завдання вимірювання вологості та моніторингу стану ґрунтів, а також проведення швидких дослідів, розроблено пристрій, який відносять до сільськогосподарської меліорації (до засобів вологометрії та телеметрії якості ґрунту), і може бути використаний для експрес-аналізу вологості та основних показників ґрунту на ділянці меліоративної системи.

Відомий пристрій для визначення вологості ґрунту, що містить наповнений водою шпаруватий керамічний циліндр, який контактує з ґрунтом, на нього, своєю чергою, надіто додатковий пластмасовий циліндр, з'єднаний тонкою прозорою трубкою, яка розміщена на шкалі реєстраційного приладу для перетворення вимірюваної фізичної величини всмоктувального тиску в іншу величину, яку можна безпосередньо відобразити на реєстраційному приладі [10].

Недоліками цього пристрою є те, що за використання як чутливих елементів еластичних циліндрів, не враховують фізичних характеристик елементів, що негативно впливає на точність вимірювання. Окрім цього, в польових умовах використання цього пристрою обмежене через використання ртутного п'єзометра, що є небезпечним під час експлуатації. Вимірювання вологості ґрунту обмежується діапазоном 10-15 см у глибину, що є недостатнім для фактичного визначення вологозапасів у кореневмісному шарі ґрунту.

Найбільш близьким до запропонованого пристрою за технічними можливостями є тензіометр для експрес-аналізу вологості ґрунту. Він складається з циліндра (накопичувальної камери), керамічного фільтра, вимірювача тиску, мікронасоса та перфорованої витяжної трубки [17]. Недоліками описаного прототипу є висока інерційність вимірювань та низька точність результатів вимірювань. Окрім цього, використання пристрою обмежене вимірюванням тільки вологості без визначення інших параметрів ґрунту.

Корисна модель спрямована на зменшення інерційності вимірювань за рахунок збільшення контактної площі ґрунту з накопичувальними камерами, підвищення точності вимірювань шляхом створення розрідження в циліндричній накопичувальній камері та визначення електропровідності ґрунту.

Поставленого завдання досягають тим, що у гідроелектричному пристрої експрес-аналізу якості ґрунту, який складається із циліндричної накопичувальної камери, керамічного фільтра, вимірювача тиску, мікронасоса та витяжної перфорованої трубки, додаткова накопичувальна камера гідравлічно з'єднана електромагнітним клапаном із циліндричною накопичувальною камерою, паралельно витяжній перфорованій трубці розташовано електрод, а на додатковій накопичувальній камері встановлено електронний давач якості з контактом із відпрацьованою вологою на дні камери.

Волога, яка просочилась через керамічний фільтр і насичила ґрунт, за допомогою перфорованої витяжної трубки та створеного вакуумним мікронасосом розрідження переміщується в додаткову накопичувальну камеру відпрацьованої вологи, вимірюються показники всмоктувального тиску, електропровідності ґрунту та вміст домішок у відпрацьованій волозі, і процес вимірювання розпочинається знову, тому відпадає потреба у повторному використанні відпрацьованої води та безпосередньому контакті електронного давача якості із ґрунтом.

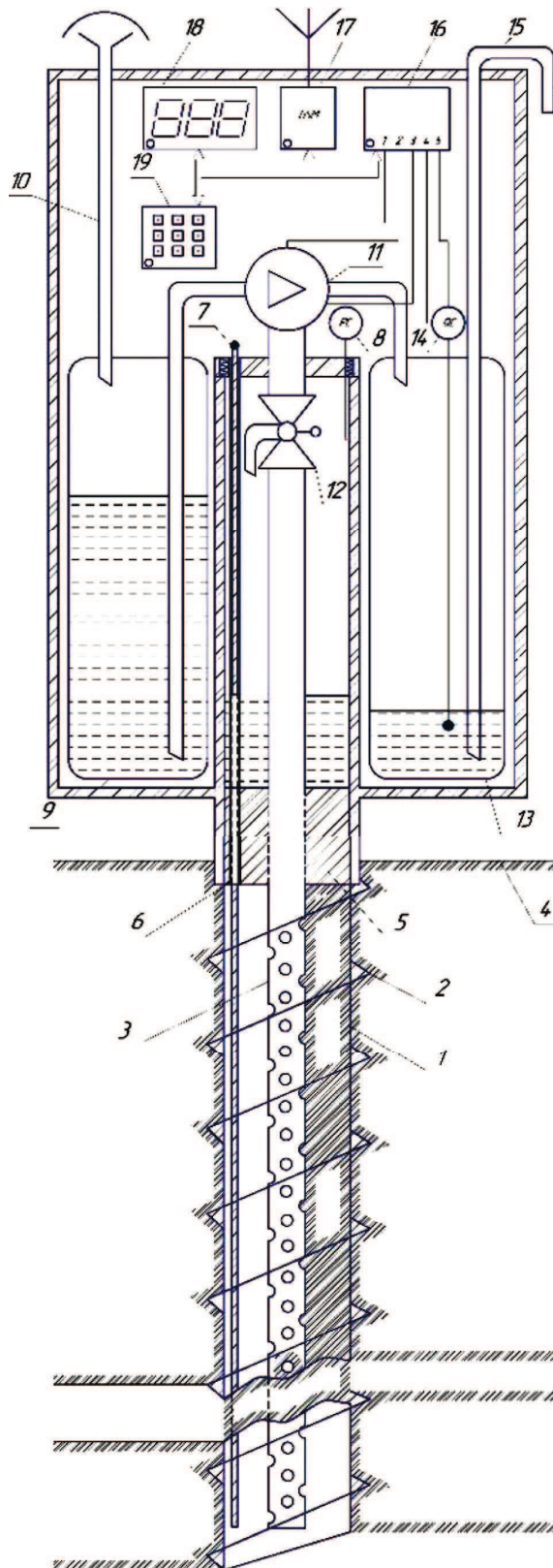


Рис. 2. Пристрій для проведення експрес-аналізу якості ґрунту / Device for rapid soil quality analysis

На рис. 2 зображено поперечний переріз пристрою експрес-аналіз якості ґрунту. Гідроелектричний пристрій експрес-аналіз якості ґрунту є товстостінною сталеву циліндричною накопичувальною камерою 1 із шнеками 2, на які нанесено відповідні позначки для оперативного контролю глибини занурення пристрою у ґрунт. Витяжна трубка 3 із перфорованими отворами для щільнішого контакту трубки із ґрунтовим шаром занурюється у ґрунт 4 по всій довжині та забезпечує до-

даткову стійкість конструкції. У керамічному фільтрі 5 вмонтовано ізоляційну втулку 6, що відділяє електрод 7 від рідини циліндричної накопичувальної камери. Значення розрідження у циліндричній накопичувальній камері фіксується електронним давачем розрідження 8 після перекачування води із резервуару 9. Трубка донання 10 з'єднує резервуар із атмосферою для уникнення створення вакууму мікронасосом 11. Електромагнітний клапан 12 забезпечує комутацію гідравлічних каналів додаткової накопичувальної камери 13 для відпрацьованої вологи. Електронний давач якості 14 проводить комплексні експрес-оцінки якості відпрацьованої вологи із ґрунтів, яку можна злити для подальших детальних лабораторних досліджень через вихідний штуцер 15. Керування пристроєм здійснюється мікроконтролером 16, виміряні дані передаються через стільникову мережу зв'язку через модем 17 та відображаються на електронному індикаторі 18. Для проведення коригування роботи пристрою та зміни потрібних параметрів використовують модуль клавіатури 19.

Під час проведення експрес-аналізу якості ґрунту електромагнітний клапан 14 комутує гідравлічну лінію резервуару 9 та циліндричної накопичувальної камери, мікронасос 11 починає перекачувати воду в циліндричну накопичувальну камеру, з якої вона через керамічний фільтр 5 просочується у ґрунт. Після того як досліджуваний ґрунт наситився, тобто значення давача розрідження 8 вийшло на усталений показник, мікроконтролер 17 фіксує це значення у внутрішній пам'яті та подає сигнал на відкриття електромагнітного клапана 12 та запуск вакуумного мікронасосу 11. Внаслідок цього розрідження у циліндричній накопичувальній камері значно зростає порівняно із фізичними властивостями досліджуваного шару ґрунту, в такий спосіб волога, якою наситився досліджуваний ґрунт почне поступово переміщуватись витяжною перфорованою трубкою 3 у додаткову накопичувальну камеру 13. Відпрацьована волога містить домішки солей та інших хімічних матеріалів, присутніх у ґрунті, величина вмісту яких визначається електронним давачем якості 14. Тривалість, упродовж якої волога переміститься в додаткову накопичувальну камеру, залежить від фізико-хімічних характеристик ґрунту та задається в програмі керування мікроконтролера. Для більш глибокого та детального дослідження відпрацьовану вологу потрібно злити через штуцер 15. Електрод 7 відокремлений від води циліндричної накопичувальної камери гумовим ізолятором та контактує безпосередньо із ґрунтом, що дає змогу провести вимірювання електропровідності ґрунту в режимі зволоження та в режимі осушення. Кількість циклів вимірювання також залежить від фізичних характеристик ґрунтового масиву і вибирається дослідним шляхом, оскільки після насичення ґрунту та переміщення рідини у додаткову накопичувальну камеру спостерігають незначні втрати рідини. Процес вимірювання проходить в 3-5 циклів, остаточне значення всмоктувального тиску розраховується мікроконтролером 17 на підставі запам'ятованих раніше значень у циклах. Кількість циклів задається в програмі керування мікроконтролера і може бути оперативно змінено в процесі роботи. Від кількості циклів вимірювань залежить похибка, з якою отримаємо остаточне значення всмоктувального тиску, в такий спосіб маємо можливість оперативно калібрувати точність приладу.

Гідроелектричний пристрій експрес-аналіз якості ґрунту забезпечує покращення експлуатаційних характеристик, завдяки мікропроцесорному керуванню електромагнітним клапаном та мікронасосом, зменшується інерційність вимірювань шляхом збільшення контактної площі ґрунту та додаткової накопичувальної камери, підвищується точність вимірювань за рахунок використання електронних давачів: вимірювача тиску та якості відпрацьованої вологи із ґрунтів [22].

З огляду на універсальність конструкції та цифрові інтерфейси, запропоновані вимірювально-аналітичні пристрої можуть бути безпосередньо інтегровані у наявні IoT-інфраструктури, зокрема – в систему TankToad [24, 20]. TankToad – це інтелектуальна інформаційно-аналітична система, яку розроблено для моніторингу стану водних резервуарів і сільськогосподарських об'єктів через супутникові та мобільні мережі. Система підтримує двосторонній зв'язок з пристроями, дає змогу проводити вимірювання в реальному часі, відстежувати критичні параметри (рівень рідини, напруга живлення, температура тощо) та передавати дані до хмарного сховища для подальшого аналізу [23].

Розрахунок вологості окремої ґрунтової ділянки.

Доступність води рослинам переважно пов'язана з величиною потенціалу (тиску) вологи, а не з величиною вологості ґрунту [13]. Тиск ґрунтової вологи є величиною від'ємною відносно атмосферного тиску і виражають в атмосферах або метрах водного стовпа. Подані в роботі тензіометричні вологоміри вимірюють капілярний потенціал ґрунтової вологи і очевидно, що за їх використання, актуальним є завдання розрахунку вологості за їх показами.

Вирішуючи ці питання, вчені запропонували методику розрахунку вмісту вологи у ґрунті за величиною потенціалу ґрунтової вологи при нормуванні ґрунтів за питомою поверхнею, але не враховують механічного складу ґрунтів, що вносить додаткову похибку, особливо в області високих вологостей [16]. Залежність потенціалу ґрунтової вологи від вологості або основна гідрофізична характеристика (ОГХ), чутлива до зміни механічного складу ґрунту.

Відповідно до основного закону термодинаміки, Л. І. Степанов вивів аналітичну функціональну залежність між капілярним потенціалом (тиском) і вмістом вологи у ґрунті різного механічного складу [12]:

$$\psi = -(ctg(\theta + c) - d), \quad \bar{\theta} = \frac{\theta - \theta_{15}}{\theta_{0,3} - \theta_{15}} \quad (1)$$

де: ψ – потенціал ґрунтової вологи (покази тензіометра, атм); θ – показник ґрунтової вологи, атм; c і d – параметри, що визначають за експериментальними даними (таблиця).

На підставі результатів вимірювань вмісту вологи у ґрунті за різних значень тиску (0,33 та 0,8 атм), які є частиною основної гідрофізичної його характеристики, для кожного типу ґрунту (див. таблицю) визначено параметри c і d рівняння (1) у спосіб розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} 0,33 = ctg(\theta_{0,33} + c) + d; \\ 0,8 = ctg(\theta_{0,88} + c) + d. \end{cases} \quad (2)$$

Усі відповідні значення експериментальних показників та розрахованих параметрів математичної моделі узагальнено в таблиці.

Таблиця. Значення параметрів математичної моделі /
Parameter values of the mathematical model

Ґрунт	Тиск, атм		Параметри математичної моделі	
	$\theta_{0,33}$	$\theta_{0,88}$	c	d
1. Ґрунти легкосуглинистого механічного складу	0,99	0,67	0,1554	0,1231
2. Торфові ґрунти	1,00	0,68	0,1762	0,1174
3. Дерново-підзолисті глієві ґрунти супіщаного механічного складу	0,99	0,7	0,0712	0,2289

За використання пристроїв вимірювання, значення вологості розраховували за залежністю

$$\theta = (\theta_{0,33} - \theta_{15}) \cdot (\arctg(\psi + c) - d) + \theta_{15}, \quad (3)$$

де $\theta_{0,33}$ і θ_{15} – вологість ґрунту за тисків ψ відповідно, що дорівнюють 15 атм і 0,33 атм (при цьому використовують експериментальні дані основної гідрофізичної характеристики для відповідних типів ґрунтів у діапазоні від низької до високої вологості). Отже, встановлено функціональний зв'язок між капілярним потенціалом (тиском) ψ та вмістом води θ у ґрунтах різного механічного складу, що дає змогу використовувати покази сенсорів для оцінювання гідрофізичного стану ґрунтів у режимі реального часу.

Моделювання технологічних режимів підґрунтового зволоження. Управління РГВ відбувається шляхом підтримання відповідного рівня у зволожувальному каналі, а цим самим напором в дренажній мережі. Підймання до верхньої межі РГВ потрібно проводити з найбільшою інтенсивністю. На ґрунтовій ділянці без постійного підтримання проміжного рівня відновлення останнього в потрібні періоди також доцільно проводити в найкоротші терміни. Єдиним шляхом інтенсифікації підймання за постійної конструкції мережі є збільшення напору в дренажній мережі, однак на величину напору накладається обмеження, зумовлене технологічними вимогами до водного режиму кореневмісного шару.

Досліди показали, що за низької провідності ґрунту в процесі зволоження спостерігають наростання бугра ґрунтових вод у зоні дренажної засипки, зумовлене різницею приходу з дрени і витрати в міждренній воді, що подається. Перепад рівнів тим більший, чим більша різниця проникності дренажної засипки і моноліту і чим вищий напір у дрени. У деякий момент часу РГВ під дреною стане дорівнювати значенню напору в дрени з урахуванням фільтраційних втрат і надалі стабілізується.

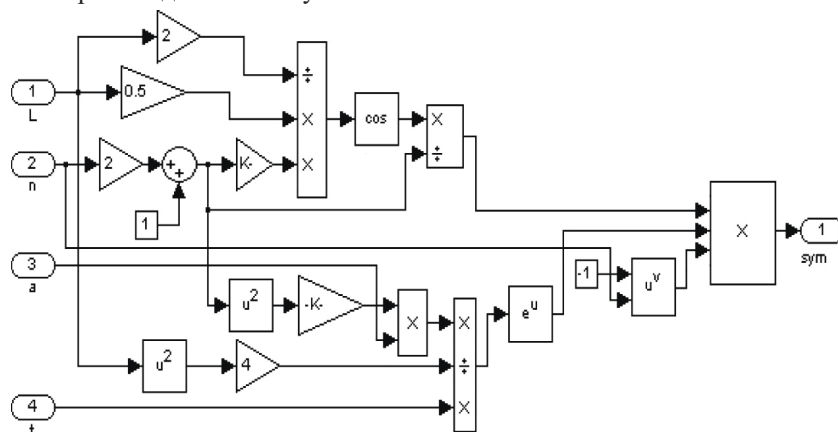


Рис. 3. Розрахункова схема визначення рівня ґрунтових вод / Computational scheme for determining the groundwater level

Отримані результати моделювання демонструють характерні перехідні процеси зміни рівня ґрунтових вод у відповідь на зовнішні керівні впливи. Зокрема, у ре-

В окремих випадках для спрощення розрахунків доцільно використовувати лінеаризоване рівняння Буссінеска:

$$\delta \frac{\partial h}{\partial t} = Kh_{cp} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}, \quad (4)$$

де: δ – коефіцієнт водонасичення; h – рівень ґрунтових вод; K – коефіцієнт фільтрації; x – горизонтальна координата.

Його отримують у спосіб усереднення фільтраційного потоку і коефіцієнта нестачі насичення. Лінеаризація дає змогу отримати достатню для інженерних розрахунків точність простішими методами.

Якщо прийняти на дрени граничну умову першого роду, то з рівняння (4) отримаємо режим РГВ на міждренні, що будемо визначати таким виразом:

$$h(x,t) = h_1 - \frac{4(h_1 - h_0)}{\pi} \times \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos \frac{(2n+1)\pi x}{2L} \text{Exp} \left(-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 a t}{4L^2} \right). \quad (5)$$

Для аналізу рівня ґрунтових вод у заданій модульній ділянці виконаємо чисельне моделювання у середовищі MatLab. Розрахунок базується на рівнянні (5), яке описує зміну рівня ґрунтових вод у часі та просторі. Враховуючи складність аналітичного виразу повної суми (5), для цілей моделювання достатньо обмежитися першими чотирма членами ряду. Такий підхід дає змогу зберегти достатню точність розрахунку за зменшення обчислювальних витрат.

Вибір тільки перших чотирьох членів зумовлений тим, що внесок наступних членів у загальний результат є незначним, і при цьому спрощується реалізація алгоритму в MatLab. Кожен член ряду, згідно з рівнянням (5), містить математичні функції, які добре відтворюються стандартними функціями MatLab.

Структуру розрахункової схеми для чисельного моделювання рівня ґрунтових вод показано на рис. 3. Відповідно до наведеної схеми, моделювання складається з таких етапів: задання вхідних параметрів, фізичні характеристики модульної ділянки та початковий рівень ґрунтових вод; обчислення рівня ґрунтових вод у кожній точці ділянки з урахуванням перших чотирьох членів ряду. Якщо на вхід системи подати сигнал завдання та величину дійсного рівня ґрунтових вод, то перехідна характеристика матиме вигляд як на рис. 4.

жимі водоподачі спостерігають різке зростання рівня з подальшим виходом на стаціонарне значення, тоді як у режимі дренажного стоку фіксують експоненційне зни-

ження рівня до встановленого фоново-гідрологічного значення. Ці особливості мають бути враховані під час розроблення алгоритмів керування рівнем зволоження для різних типів ґрунтів і кліматичних умов.

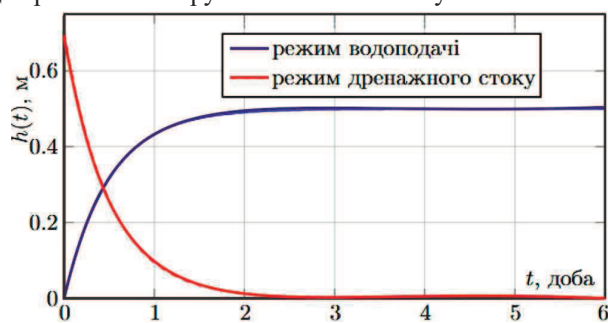


Рис. 4. Перехідна характеристика ділянки в різних режимах / Transient response of the plot under different modes

Аналіз поведінки системи за зміни граничних умов дає змогу адаптувати параметри управління для забезпечення оптимального гідрологічного режиму кореневмісного шару. Зокрема, можна регламентувати динаміку зміни напору в дренажній мережі, частоту подачі води та час утримання підвищеного рівня РГВ. Такий підхід дає змогу мінімізувати втрати води за збереження високої ефективності меліораційних заходів, що є також актуальним в умовах органічного землеробства.

Обговорення результатів дослідження. Учені у дослідженні [15] впровадили IoT-моніторинг з використанням LoRaWAN та недорогих сенсорів, однак їх система потребувала зовнішнього калібрування і не надавала додаткових параметрів. На відміну від цього, наш пристрій одночасно фіксує вологість, електропровідність і склад відпрацьованої води.

Дослідження [7] демонструє модельну систему з визначенням вологості у профілі ґрунту. Проте наш пристрій орієнтовано на експрес-оцінку конкретної ділянки з паралельним хімічним аналізом, що важливо для оперативного прийняття агротехнічних рішень.

У роботі [5] запропоновано сенсор з можливістю вимірювати вологість та солоність без порушення структури ґрунту. Хоча такий підхід знижує інвазивність, наш метод дає більш точні результати та дає змогу обробляти відпрацьовану вологу безпосередньо.

У роботі [19] наведено результати проектування передачі даних на основі архітектури Інтернету речей (IoT) для системи моніторингу та управління інтелектуальними теплицями. Автори пропонують проект двосторонньої системи передачі даних на підставі IoT-системи для моніторингу та керування розумними теплицями. Розумні вузли можуть надсилати показники мікроклімату та вологості ґрунту до віддаленої бази даних кожні 15 хвилин. Користувачі можуть дистанційно керувати виконавчими механізмами в розумній теплиці. Аналіз та тестування проекту двосторонньої системи передачі даних на підставі розумної теплиці проводилися шляхом розрахунку значень затримки та втрати пакетів даних. Середня затримка відповіді дистанційного керування виконавчими механізмами становить 14,83 с. Під час надсилання даних мікроклімату розумні теплиці мають середню затримку 14 хв. 56 с з часткою втрати пакетів 0,1 %.

У дослідженні [4] описано мобільну систему для картування солоності ґрунтів. Наша система реалізує подібну функціональність на точковому рівні в реаль-

ному часі, з можливістю інтеграції у мережеву платформу TankToad оскільки також володіє засобами супутникового позиціонування.

У роботі [8] подано новий ємнісний давач спеціальної конструкції для одночасного вимірювання вмісту вологи та солоності ґрунту. Описано повний цикл розроблення – від моделювання до виготовлення та польових випробувань, а також порівняння з провідними комерційними приладами. Є спільні риси із нашим: теж вимірюють вологомісткість ґрунту та електропровідність, що відповідає якості води і дані збираються в реальному часі. Відмінне: сенсор Escribe – статичний зонд без рухомих частин, що забезпечує <1 хв відгук, тоді як у нас застосовано гідроелектричний відбір вологи вакуумом та тензіометри, що дещо складніше механічно. Але наша система має перевагу в тому, що може експрес-аналізувати ще й склад вилученої вологи (ознака якості води) окремим електронним давачем.

У роботі [14] досліджено сенсор вологості типу SKU: SEN0193. Виявлено, що він дає неточні результати на органічному субстраті, але працює прийнятно на садовому ґрунті. Наш пристрій, на відміну від цього сенсора, має власну точну вимірювальну систему з вакуумним відбором вологи та враховує механічний склад ґрунту. Адже саме від механічного складу залежить водоутримна здатність ґрунту та характер його взаємодії з вологою. Це дає змогу адаптувати результати обчислення до конкретних умов ділянки.

Аналіз сучасних наукових праць засвідчив, що хоча багато досліджень у сфері IoT-моніторингу вологості ґрунтів роблять акцент на спрощених або вузькоспеціалізованих рішеннях (наприклад, вимірювання тільки вологості або солоності), водночас як комплексних підходів, які поєднували б фізико-хімічний аналіз, вакуумне вилучення вологи, урахування механічного складу ґрунту та інтеграцію з іншими системами, не було виявлено. Вимірювальна система, яку ми запропонували, поєднує зазначене, забезпечуючи точну локальну оцінку стану ґрунту в режимі реального часу. Такий рівень інтеграції та аналітичних можливостей відсутній у проаналізованих роботах, що підтверджує як доцільність, так і новизну проведеного дослідження.

Отже, внаслідок виконаної роботи можна сформулювати такі наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження – удосконалено метод експрес-аналіз якості ґрунтів, який, на відміну від наявних методів, дає змогу в польових умовах визначати не тільки їхню вологість, а й електропровідність і хімічний склад відпрацьованої вологи з використанням мікропроцесорного керування та комп'ютерного моделювання.

Практична значущість результатів дослідження – результати роботи можна безпосередньо впровадити в аграрну практику для підвищення ефективності управління водним режимом ґрунтів, удосконалення меліоративних процесів та зниження екологічного навантаження на ґрунтові екосистеми.

Висновки / Conclusion

Розроблено систему моніторингу вологості ґрунтів з використанням спеціалізованих вимірювальних пристроїв і комп'ютерного моделювання в режимі водонасичення чи осушення, що дає змогу здійснювати комплекс-

сне визначення його вологості, електропровідності та складу відпрацьованої води безпосередньо в польових умовах. За результатами проведеного дослідження можна зробити такі основні висновки.

1. Розроблено конструкцію гідроелектричного пристрою експрес-аналізу якості ґрунту, що забезпечує визначення вологості, електропровідності та хімічного складу відпрацьованої води з високою точністю та низькою інерційністю.
2. Сформульовано архітектуру локальної системи моніторингу з використанням бездротової передачі даних і мікропроцесорного керування для автономної роботи в польових умовах, яка дає змогу забезпечувати оперативне оброблення та передачу даних до центральної аналітичної платформи.
3. Проведено математичне моделювання перехідних процесів зволоження й дренажу ґрунтів із використанням лінеаризованого рівняння Буссінеска, що дало змогу кількісно описати динаміку рівня ґрунтових вод.
4. Реалізовано побудовані моделі у середовищі Matlab для подальшої інтеграції в автоматизовані системи керування меліоративними процесами, що уможливило розрахунок оптимальних режимів управління водним режимом ґрунтів на основі реальних даних сенсорного моніторингу та фізико-математичних моделей.
5. Встановлено можливість інтеграції розроблених сенсорних пристроїв у масштабовану інформаційно-аналітичну платформу TankToad для централізованого збирання та аналізу даних у реальному часі, що забезпечило розширення функціональності системи для централізованого прийняття рішень у реальному часі.
6. Підтверджено, що результати дослідження відповідають поставленій меті й можуть бути використані для впровадження адаптивних IoT-рішень у системах сталого землеробства.

Подяка. Публікація містить результати наукових досліджень, проведених у межах науково-технічного розроблення Міністерства освіти і науки України "Інформаційно-аналітична система органічного землеробства та забезпечення екологічної стійкості ґрунтів" (№ ДР0120U000235).

Автори щиро дякують Збройним Силам України за можливість продовжувати наукову діяльність і проводити дослідження в умовах воєнного часу.

References

1. Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2023). Internet of Things (IoT) for Soil Moisture Tensiometer Automation. *Micromachines*, 14(2), article ID 263. <https://doi.org/10.3390/mi14020263>
2. Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Elkamouh, A., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2024). Towards Affordable Precision Irrigation: An Experimental Comparison of Weather-Based and Soil Water Potential-Based Irrigation Using Low-Cost IoT-Tensiometers on Drip Irrigated Lettuce. *Sustainability*, 16(1), article ID 306. <https://doi.org/10.3390/su16010306>
3. Abdelmoneim, A. A., Kimaita, H. N., Al Kalaany, C. M., Derardja, B., Dragonetti, G., & Khadra, R. (2025). IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(7), 1–25. <https://doi.org/10.3390/s25072291>
4. Bashir, R. N., Bajwa, I. S., Abbas, M. Z., Rehman, A., Saba, T., Bahaj, S. A., & Kolivand, H. (2022). Internet of Things (IoT) assisted soil salinity mapping at irrigation schema level. *Applied Water Science*, 12, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01619-1>
5. Chavanne, X., & Frangi, J.-P. (2024). A Sensor to Monitor Soil Moisture, Salinity, and Temperature Profiles for Wireless Networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(3), 1–25. <https://doi.org/10.3390/jsan13030032>
6. Comegna, A., Di Prima, S., Hassan, S. B. M., & Coppola, A. (2025). A Novel Time Domain Reflectometry (TDR) System for Water Content Estimation in Soils: Development and Application. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(4), article ID 1099. <https://doi.org/10.3390/s25041099>
7. Comegna, A., Hassan, S. B. M., & Coppola, A. (2024). Development and Application of an IoT-Based System for Soil Water Status Monitoring in a Soil Profile. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s24092725>
8. Escriba, C., Aviña Bravo, E. G., Roux, J., Fourniols, J.-Y., Contardo, M., Acco, P., & Soto-Romero, G. (2020). Toward Smart Soil Sensing in v4.0 Agriculture: A New Single-Shape Sensor for Capacitive Moisture and Salinity Measurements. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(23), 1–23. <https://doi.org/10.3390/s20236867>
9. Hardie, M. (2020). Review of Novel and Emerging Proximal Soil Moisture Sensors for Use in Agriculture. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(23), article ID 6934. <https://doi.org/10.3390/s20236934>
10. Kaschiev, O. Y., & Lymar, V. A. (2005). Device for determining moisture content in soil (tensiometer) (15512). Ukraine. URL: <https://ua.patents.su/2-15512-prilad-dlya-viznachennya-vologosti-gruntu-tenziometr.html>
11. Melton, F. S., Johnson, L. F., Lund, C. P., Pierce, L. L., Michaelis, A. R., Hiatt, S. H., Guzman, A., Adhikari, D. D., Purdy, A. J., Rosevelt, C., Votava, P., Trout, T. J., Temesgen, B., Frame, K., Sheffner, E. J., & Nemani, R. R. (2012). Satellite Irrigation Management Support With the Terrestrial Observation and Prediction System: A Framework for Integration of Satellite and Surface Observations to Support Improvements in Agricultural Water Resource Management. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(6), 1709–1721. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2214474>
12. Pastushenko, V. Y., Matus, S. K., & Shatniy, S. V. (2012). Technical means of remote monitoring of soil moisture on controlled modules of dehumidification and humidification systems. *Bulletin of Engineering Academy of Ukraine*, 1, 87–91. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Viau_2012_1_19
13. Pastushenko, V., & Stetsenko, A. (2010). Development, modeling and technical implementation of automated control system of soils moistness by underground irrigation. In *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, pp. 33–34. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5445959>
14. Placidi, P., Gasperini, L., Grassi, A., Cecconi, M., & Scorzoni, A. (2020). Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 20(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s20123585>
15. Placidi, P., Morbidelli, R., Fortunati, D., Papini, N., Gobbi, F., & Scorzoni, A. (2021). Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors*, 21(15), 1–28. <https://doi.org/10.3390/s21155110>
16. Romashchenko, M., Baliuk, S., Tarariko, Y., & Lisoviy, V. (2022). Development and implementation of the Agricultural Information Support System. *Bulletin of Agricultural Science*, 100, 5–13. <https://doi.org/10.31073/agrovissnyk202209-01>
17. Shatniy, S. V., & Matus, S. K. (2011). Tensiometer for express-analysis of soil humidity (66701). URL: <https://iprop-ua.com/inv/vk3affj>. URL: <https://ua.patents.su/3-66701-tenziometr-dlya-ekspres-analizu-vologosti-runtu.html>
18. Shatniy, S., Kuniyskyi, S., Volkov, V., & Shatna, A. (2021, September – 2021, September). Information Technology of Data Processing and Analysis on Automated Measuring Complex of Water Systems Stability. In *2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, pp. 123–127. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSIT52700.2021.9648816>
19. Sofwan, A., Sumardi, Adhipratama, F. R., Budiraharo, K., & Karano. (2022). Data Communication Design Based on Internet of Things Architecture for Smart Greenhouse Monitoring and Controlling System. *2022 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICOICT)*, Yogyakarta

- ta, Indonesia, pp. 205–209. <https://doi.org/10.1109/ICOIACT55506.2022.9971912>
20. Tank Toad. (2021, May 9). *Remote Monitor Equipment | Tank Toad*. URL: <https://www.tanktoad.com/>
 21. Zhang, X., Feng, G., & Sun, X. (2024). Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, article ID 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>
 22. Zhukovskyy, V. V., Shatnyi, S. V., & Zhukovska, N. A. (2020). Hydroelectric device for rapid soil quality analysis (145988). URL: <https://iprop-ua.com/inv/pdf/b4f9bje-pub-description.pdf>
 23. Zhukovskyy, V., Printz, D., & Zhukovska, N. (2023). Human-computer interaction in IoT system for water tank monitoring and controlling. *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324294>
 24. Zhukovskyy, V., Printz, D., Zhukovska, N., Hubach, M., & Rajab, H. (2021, July – 2021, July). IoT based Intelligent Information-Analytical System Architecture for Water Tank Monitoring. In *2021 International Conference on Information Technology (ICIT)* pp. 924–928. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT52682.2021.9491762>

V. V. Zhukovskyy, S. V. Shatnyi, N. A. Zhukovska, A. V. Shatna

National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

IOT-BASED MEASURING AND ANALYTICAL TOOLS FOR SOIL MOISTURE MONITORING

Effective management of the soil water regime is one of the key challenges in modern agricultural production, especially under the conditions of precision and organic farming, which require accurate moisture control without disrupting ecological balance. Achieving this goal is possible through the use of high-precision measuring and analytical tools capable of operating autonomously in real field conditions. Within the framework of this study, a hardware-software monitoring system was developed, which includes a hydroelectric device for rapid soil quality assessment, pressure and conductivity sensors, and a microcontroller-based control unit supporting wireless data transmission. A local monitoring system architecture adapted for use in controlled modules of drainage and irrigation systems is proposed. This system enables continuous collection and transmission of data on soil moisture, electrical conductivity, and the composition of extracted moisture. Mathematical modeling of transient saturation and drainage processes was carried out using a linearized form of the Boussinesq equation. A methodology for calculating soil moisture content based on tensiometer readings was implemented, taking into account the physical and mechanical properties of soils with different textures. Computational models were developed in the Matlab environment to simulate typical transient processes in the soil profile, which can be used to optimize real-time moisture management algorithms. The developed measuring device is characterized by low response time, high measurement accuracy, and the ability to operate autonomously. Its design allows effective adaptation to various soil types and climatic conditions. An important advantage is the potential for integration into the scalable IoT-based information-analytical platform TankToad, which provides centralized monitoring, processing, and storage of telemetry data from a large number of connected devices. The results presented in this work confirm the feasibility of the proposed technical solution and its applicability for the development of adaptive digital systems for managing the soil water regime in sustainable agriculture.

Keywords: information technology; hardware-software systems; control systems; digital agrotechnologies; telemetry; field measurements.