

Демчук Д.О., (1: ORCID: 0000-0003-0156-0299)

аспірант

Демчук О.С., (2: ORCID: 0000-0002-8318-5009)

к.т.н., доцент

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, м. Київ¹ Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне

АНАЛІЗ ВІДМОВ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ АВТОМАТИЧНОЇ СТАНЦІЇ МОНІТОРИНГУ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ БУФЕРИЗАЦІЇ ВИМІРЮВАНЬ

Системи підтримки прийняття рішень в управлінні зрошенням спираються на контур зворотного зв'язку, в якому вимірювання потенціалу ґрунтової вологи проходить шлях від сенсора, розташованого на об'єкті дослідження, до бази даних, розміщених на сервері, через контролер станції, канал мобільного зв'язку та серверний приймач. Готовність такої системи визначається властивостями всього ланцюга, а не лише точністю окремого сенсора, і для рішень на низьковартісних пристроях Інтернету речей вона в літературі описана значно гірше, ніж метрологічні характеристики самих сенсорів.

Дві станції власної розробки експлуатували протягом двох вегетаційних сезонів (2024, 2025 р.р.) і за їхніми даними встановлено, що коефіцієнт повноти ряду спостережень становить 0,508. Коефіцієнт між роками практично не змінюється. Втрати мають різний характер: 44,1 % очікуваних передач припадає на тривалі перерви, а 5,0 % – на поодинокі пропуски. Ці дві складові мають різну природу. Вони потребують відмінних заходів, щоб їх усунути.

Основний результат стосується умов, за яких буферизація вимірювань на боці пристрою справді підвищує надійність. Установлено, що буферизація дає ефект лише тоді, коли підтвердження приймання формується сервером після фактичного запису в базу даних. Зафіксовано протилежний випадок: обробник помилки серверного сценарію повертав код успішного завершення, унаслідок чого пристрій звільняв буфер, і механізм, запроєктований як засіб підвищення надійності, ставав механізмом гарантованої втрати даних без жодної зовнішньої ознаки. Запропоновано вимоги до протоколу підтвердження, за яких така поведінка неможлива.

Ключові слова: моніторинг вологості ґрунту; автоматичний тензіометр; Інтернет речей; надійність передавання даних; буферизація; коефіцієнт готовності; система підтримки прийняття рішень; зрошення.

Вступ. Оперативне управління поливами за фактичним станом вологозабезпечення ґрунту або з використанням алгоритмів прогнозу вимагає безперервного надходження даних за допомогою контуру зворотного зв'язку [1]. Рішення про строк і норму поливу нерідко приймається за показами вимірювальних пристроїв, тому пропуск у ряді спостережень означає не просто відсутність запису в базі даних, а й неможливість сформулювати рекомендацію на цю дату. З погляду користувача системи підтримки прийняття рішень пропуск через розряджений акумулятор, пропуск через відсутність покриття мобільної мережі й пропуск через помилку в серверному сценарії нічим не відрізняються.

Автоматичні станції на низьковартісних компонентах Інтернету речей, у т.ч. у системах підтримки прийняття рішень для зрошення [2], зробили польовий моніторинг доступним для дослідних ділянок і невеликих господарств. Проте такі рішення проєктуються з розрахунку на дешевизну й масовість, а не на резервування: у типовій станції немає ані дубльованого каналу зв'язку, ані резервного джерела живлення, ані незалежного шляху доставки даних. Відмова будь-якої ланки ланцюга «сенсор – контролер – канал – приймач – база даних» однаково призведе до переривання надходження даних.

Стандартною відповіддю на нестійкість каналу зв'язку є буферизація: пристрій зберігає дані вимірювань в локальній пам'яті й повторно надсилає їх, коли зв'язок відновлюється. Механізм простий і широко відомий. Проте його дієвість цілком залежить від того, як пристрій дізнається про успішність передавання – а це питання протоколу підтвердження, яке в описах подібних систем зазвичай взагалі не розглядається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматичні тензіометри [3] для моніторингу вологи у ґрунті використовуються вже тривалий час. Конструкцію на основі мікроконтролерів ESP32 і барометричних сенсорів тиску досліджено в кількох роботах останніх років. У [4] прототип на ESP32 і сенсорі BMP180 порівняно з механічним тензіометром і одержано коефіцієнт детермінації близько 0,8 за середньоквадратичною похибкою 4,25...7,1 кПа; там само наведено порівняння режимів призначення поливів за погодними даними та за потенціалом ґрунтової вологи. У [5] для приладу того самого класу в діапазоні до -80 кПа одержано коефіцієнт детермінації 0,99. Обидві роботи присвячені метрологічним характеристикам сенсора. У станціях, розглянутих у цій роботі, застосовано цифровий барометричний сенсор BME280, який передає значення тиску інтерфейсом I²C без проміжного аналого-цифрового перетворення.

Літературні джерела [6–9] описують бездротові сенсорні мережі для управління зрошенням. Дослідження [10] розглядає надійність бездротових сенсорних мереж сільськогосподарського призначення, застосовуючи аналіз дерева відмов. Ця робота формує формальний апарат.

Вона спирається на довідкові інтенсивності відмов елементів, а не на дані тривалої польової експлуатації. У праці [11] автори калібрують низьковартісні сенсори вологості та моделюють їхню похибку.

Таким чином, у літературі докладно описано, наскільки точно вимірює сенсор, і запропоновано апарат для розрахунку надійності мережі за довідковими даними. Значно менше уваги приділено тому, яка частка виміряного фактично досягає бази даних протягом сезону і які саме ланки ланцюга це визначають. Саме цю прогалину спрямована закрити ця робота.

Мета досліджень. Необхідно кількісно оцінити надійність контуру передавання даних автоматичних станцій моніторингу вологості ґрунту за даними фактичної експлуатації. Далі слід установити структуру втрат за характером. Окремо слід визначити умови, за яких буферизація даних вимірювань на боці пристрою справді підвищує ефективність системи.

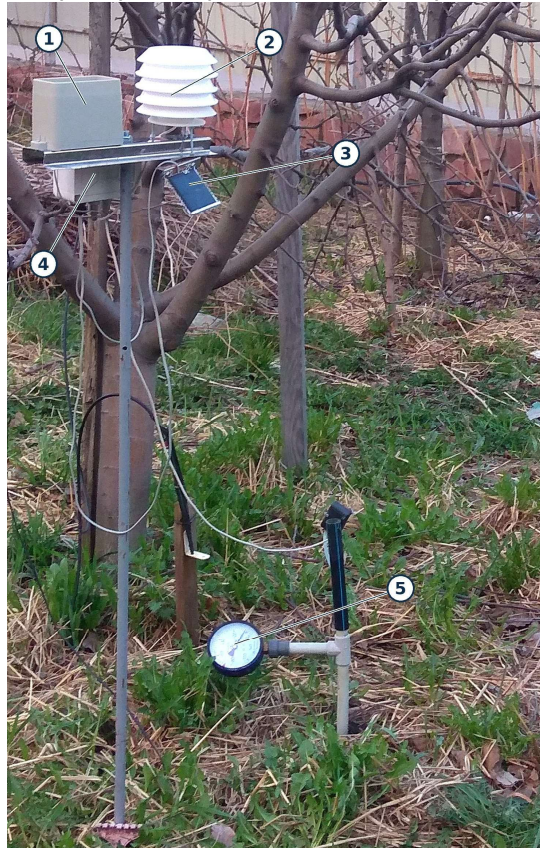


Рис. 1. Станція моніторингу мікроклімату та потенціалу ґрунтової вологи на дослідній ділянці: 1 – автоматичний дощомір; 2 – захисна оболонка із термігігрометром; 3 – сонячна панель; 4 – блок електроніки з контролером і GSM-модемом; 5 – автоматичний тензіометр із механічним вакууметром для контрольних вимірювань

Матеріали і методи. Дослідження виконано на основі даних двох станцій моніторингу (рис.1). Станції розроблено нами, вони відрізняються апаратною платформою та сенсором тиску (табл. 1) і передають дані каналом мобільного зв'язку безпосередньо на сервер, де серверний сценарій записує їх до реляційної бази даних.

Таблиця 1.

Характеристики станцій моніторингу

Параметр	Станція А (с. Гатне)	Станція Б (с. Бушеве)
Обчислювальна платформа	LilyGO TTGO T-Call: ESP32 і модем SIM800L на одній платі	Arduino Nano з окремим модулем SIM800L
Сенсор тиску	BME280, цифровий, інтерфейс I ² C	BME280, цифровий, інтерфейс I ² C
Фактичний крок квантування ряду	≈ 20 Па	≈ 110 Па
Кількість горизонтів	3	2
Медіанний інтервал передавання	30 хв 29 с	32 хв
Період спостереження	11.04.2025 – 25.08.2026	2025 – 2026 рр.
Режим експлуатації	Сезонний (квітень – жовтень)	Сезонний

Фактичний крок квантування ряду, який наведено у табл. 1, емпірично визначають як моду різниць між сусідніми унікальними значеннями. Він відображає заокруглення. Прошивка застосовує його, коли формує запис, а він не відображає роздільну здатність самого сенсора, яка є істотно вищою.

Для оцінювання використано два різні за змістом показники. Класичний коефіцієнт готовності за часом

$$K_r(t) = T_{роб} / (T_{роб} + T_{прост}) \quad (1)$$

де $T_{роб}$ – сумарний час працездатного стану, год; $T_{прост}$ – сумарний час перебування в перервах, год, що не враховує поодиноких втрачених передач за умов формально працездатної станції. Тому додатково введено коефіцієнт повноти ряду спостережень

$$K_p = N_{факт} / N_{очік}, \quad N_{очік} = T / \Delta t_{мед} \quad (2)$$

де $N_{факт}$ – фактична кількість записів за період T ; $\Delta t_{мед}$ – медіанний фактичний інтервал між записами. Принципово, що за базу береться саме медіанний фактичний інтервал, а не номінальний інтервал прошивки: медіана стійка до викидів і відображає режим, у якому станція реально працює, тоді як використання номінального інтервалу систематично занижує оцінку готовності.

Різниця між двома показниками має самостійний діагностичний зміст і дорівнює частці втрат. Ці втрати не пов'язуються з тривалими перервами.

Контур передавання не має резервування на жодній ланці. Теорія надійності розглядає його як систему з послідовним з'єднанням елементів:

$$K_{\text{сист}} = \prod K_i, \quad i = 1 \dots m \quad (3)$$

Із цього співвідношення випливає, що готовність системи не може перевищувати готовність найгіршої ланки. Кожна ланка має готовність. Її готовність не нижча за готовність, яку виміряли для системи в цілому.

Прошивка реалізує механізм буферизації. Цей механізм зберігає до 50 вимірювань у флеш-пам'яті пристрою. Станції не мають годинника реального часу. Разом зі значенням передається не позначка часу, а часовий інтервал вимірювання в секундах. Серверний сценарій відновлює фактичний момент вимірювання та відлічує вік від часу приймання. Це зберігає хронологічну коректність ряду для записів, які відкладає система.

Під час опрацювання вибірки міжсезонні перерви, коли обладнання демонтовано, виключено з розрахунків; тестові записи, створені під час налагодження серверної частини, відокремлено й також виключено.

Результати досліджень та їх обговорення. Готовність контуру передавання. Розрахунок коефіцієнта повноти ряду за сезонами наведено в табл. 2.

Таблиця 2.

Коефіцієнт повноти ряду спостережень станції А

Показник	Сезон 2025	Сезон 2026	Разом
Період	11.04 – 02.10	17.05 – 25.08	–
Тривалість, год	4 161,6	2 407,2	6 568,8
Записів фактично Nфакт	3 986	2 693	6 679
Очікувано Nочік	8 325	4 816	13 141
Коефіцієнт повноти Kп	0,479	0,559	0,508
Діб хоча б з одним записом	133 з 173	77 з 100	210 з 274

Приблизно половина очікуваних передач не досягає сервера. Цей показник практично не змінюється між сезонами незалежно від того, як довго триває період, які погодні умови спостерігаються і в якому стані перебуває обладнання. Він залишається стабільним між роками. Це виключає те, що втрати виникають випадково, і вказує на систематичну причину.

Сумарний час, протягом якого об'єкт перебуває в тривалих перервах, становить 2 900 год із 6 569 год активного періоду. За формулою (1) коефіцієнт готовності за часом дорівнює 0,559. Два показники дозволяють розкласти втрати за характером (табл. 3).

Таблиця 3.

Структура втрат передач станції А

Складова втрат	Частка очікуваних передач	Природа	Засіб усунення
Тривалі перерви	44,1 %	Відмова живлення або каналу зв'язку	Резервування живлення та каналу
Поодинокі пропуски	5,0 %	Невдалий окремих сеанс за працездатності станції	Буферизація з повторним надсиланням
Разом	49,2 %		

Розклад має безпосереднє практичне значення. Дві складові втрат мають різну природу й не усуваються тим самим заходом: тривалі перерви потребують резервування джерела живлення та каналу передавання, тоді як поодинокі пропуски усуваються виключно буферизацією вимірювань на боці пристрою. Приблизно 660 записів, або 5,0 % очікуваного обсягу, належать до другої категорії й підлягають відновленню без жодних змін в апаратній частині.

Умови дієвості буферизації. Буферизація зберігає результат вимірювання, доки пристрій не отримає те, що він тлумачить як підтвердження приймання цього результату. Дієвість механізму повністю визначається саме цим.

Під час експлуатації зафіксовано випадок, який показує критичність цієї умови. Обробник помилки серверного сценарію повертає код успішного завершення незалежно від того, чи успішно завершився запис до бази даних. Пристрій отримав такий код. Він вважав передавання успішним і видаляв дані вимірювання із буфера. Вимірювання втрачалося остаточно без жодної зовнішньої ознаки: станція виходила на зв'язок за розкладом, лічильник успішних передач зростав, а буфер залишався вільним.

Механізм, запроєктований як засіб підвищення надійності, у такій конфігурації перетворюється на механізм гарантованої втрати даних. Без буферизації невдала передача призвела б до пропуску одного запису, який залишився б у пам'яті пристрою до наступного сеансу; за буферизації з хибним підтвердженням запис знищується самим пристроєм. Цей результат є основним висновком роботи.

Звідси впливають вимоги до протоколу підтвердження, за яких описана поведінка неможлива:

Сервер формує підтвердження виключно після того, як фактично завершує транзакцію запису до бази даних. Він не формує його, оскільки прийняв запит.

Будь-який шлях, у якому виконується серверний сценарій і який не завершується записом, повертає код помилки. Обробник помилки повертає

код успіху. Якщо з обробника помилки повертається код успіху, це слід розглядати як дефект категорії втрати даних.

Підтвердження містить ідентифікатор саме того вимірювання, яке записано. Сторонній запис не звільняє буфер за таким підтвердженням.

Пристрій звільняє позицію буфера лише тоді, коли отримує підтвердження з відповідним ідентифікатором. Якщо він не отримує такого підтвердження, пристрій зберігає дані вимірювання до наступного сеансу.

Останні дві вимоги виходять за межі усунутого конкретного дефекту. Вони роблять протокол ідемпотентним. Якщо підтвердження втрачено, система повторно надсилає вимірювання, і протокол не породжує дублікат. Потреба в такій поведінці підтверджується даними. Вибірка станції А за 2026 р. містить 3 032 позначки часу з кількома записами, з яких 3 031 є точними копіями. Ці дані підписують саме таку ситуацію.

Експеримент з буферизацією. Для оцінювання ефекту буферизації виконано серію сеансів передавання за штучно погіршених умов зв'язку (табл. 4). Порівнювалися три конфігурації: без буферизації, буферизація з підтвердженням за фактом приймання запиту та буферизація з підтвердженням за фактом запису до бази даних.

Таблиця 4.

Частка доставлених даних вимірювань за різних конфігурацій
підтвердження (дані ілюстративні)

Конфігурація	Успішних сеансів, %	Доставлено вимірювань, %	Утрачено остаточно, %
Без буферизації	62	62	38
Буферизація, підтвердження за прийманням запиту	97	71	29
Буферизація, підтвердження за записом до бази	97	99	1

Друга конфігурація демонструє явище, яке описано вище: частка успішних сеансів з погляду пристрою висока, тоді як частка фактично доставлених вимірювань залишається низькою. Розбіжність між цими двома показниками є практичною ознакою хибного протоколу підтвердження. Її можна використовувати для діагностики без доступу до вихідного коду серверної частини.

Розділення апаратної готовності та готовності послуги. Два показники готовності слід розрізняти окремо. На практиці їх часто змішують, і для однієї зі станцій зафіксовано, що передавання припинилося за повністю справною обладнання: заряд акумулятора становив 54 % від номінального, сенсор і контролер не відмовили, а вичерпаний баланс послуги мобільного зв'язку зумовив, що станція

припинила передавання. Апаратно-програмну готовність обчислено за часом доступності послуги. Вона становила 0,875, тоді як готовність системи як послуги за весь період спостереження становила 0,475.

Розрив між цими значеннями є кількісною мірою впливу організаційно-експлуатаційних чинників. При оцінюванні технічних рішень коректним показником є перший, при оцінюванні системи підтримки прийняття рішень — другий, оскільки для споживача даних результат простою через несплату зв'язку тотожний результату апаратної відмови.

Висновки. 1. Коефіцієнт повноти ряду спостережень автоматичної станції моніторингу вологості ґрунту становить 0,508 і практично не змінюється між сезонами (0,479 і 0,559), що вказує на систематичну, а не епізодичну причину втрат передач.

2. Утрати передач розкладено за характером: 44,1 % очікуваного обсягу припадає на тривалі перерви, а 5,0 % – на поодинокі пропуски. Складові мають різну природу. Першу усувають резервуванням живлення та каналу зв'язку, а другу – виключно буферизацією даних вимірювань на боці пристрою.

3. Установлено, що буферизація підвищує надійність лише за умови, що сервер формує підтвердження приймання після фактичного запису до бази даних. Ця умова є необхідною. За хибного протоколу підтвердження механізм перетворюється на механізм гарантованої втрати даних без жодної зовнішньої ознаки, оскільки станція виходить на зв'язок за розкладом, а лічильник успішних передач зростає.

4. Сформульовано вимоги до протоколу підтвердження, що унеможливають таку поведінку: підтвердження за фактом завершення транзакції, повернення коду помилки з усіх шляхів без запису, ідентифікація підтверджуваного вимірювання та ідемпотентність повторного надсилання.

5. Розбіжність між часткою успішних сеансів з погляду пристрою та часткою фактично доставлених вимірювань запропоновано як діагностичну ознаку хибного протоколу підтвердження. Її можна застосувати, якщо не можна отримати вихідний код серверної частини.

6. Обґрунтовано, що необхідно розрізняти апаратно-програмну готовність системи та готовність системи як послуги, бо для дослідженої станції ці показники становлять 0,875 і 0,475 відповідно. Різниця між ними кількісно відображає, як впливають організаційно-експлуатаційні чинники на готовність системи як послуги.

1. Kovalchuk V. P., Balykhina H. A., Kovalchuk P. I., Yatsiuk M. V., Voitovych O. P., Demchuk D. O. Managing Irrigation Systems under Climate Change: Assessing Crop Water Demand and Developing Water-Saving Solutions. In: Irrigation Management: Strategies, Sustainability and Agricultural Advancements / eds. M. Elbana, Y. Brouziyne. New York: Nova Science Publishers, 2025. P. 37–70. <https://doi.org/10.52305/UQGT5734> 2. Kovalchuk

V., Demchuk O., Demchuk D., Voitovich O. Data Mining for a Model of Irrigation Control Using Weather Web-Services. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018* / eds. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 754. Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_14 **3.** Thalheimer M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. *Journal of Agricultural Engineering*, 2013, 44(3), e16. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.e16> **4.** 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*, 2024, 16(1), 306. <https://doi.org/10.3390/su16010306> **5.** Internet of Things (IoT) for Soil Moisture Tensiometer Automation. *Micromachines*, 2023, 14(2), 263. <https://doi.org/10.3390/mi14020263> **6.** Kovalchuk V., Voitovich O., Demchuk D., Demchuk O. Development of Low-Cost Internet-of-Things (IoT) Networks for Field Air and Soil Monitoring Within the Irrigation Control System. In: *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020* / eds. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1247. Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_8 <https://doi.org/10.52305/UQGT5734> **7.** Song J. J., Zhu Y. L. Environment monitoring system for precise agriculture based on wireless sensor network. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 475, pp. 127–131. **8.** Khan F., Shabbir F., Tahir Z. A fuzzy approach for water security in irrigation system using wireless sensor network. *Science International*, 2014, 26(3). **9.** Villarrubia G., De Paz J. F., De la Iglesia D. H., Bajo J. Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation. *Sensors*, 2017, 17(8), 1775. <https://doi.org/10.3390/s17081775> **10.** Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications. *Sensors*, 2021, 21(22), 7683. <https://doi.org/10.3390/s21227683> **11.** Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. *Sensors*, 2021, 21(15), 5110.

REFERENCES

1. Kovalchuk V. P., Balykhina H. A., Kovalchuk P. I., Yatsiuk M. V., Voitovych O. P., Demchuk D. O. Managing Irrigation Systems under Climate Change: Assessing Crop Water Demand and Developing Water-Saving Solutions. In: *Irrigation Management: Strategies, Sustainability and Agricultural Advancements* / eds. M. Elbana, Y. Brouziyne. New York: Nova Science Publishers, 2025. P. 37–70. <https://doi.org/10.52305/UQGT5734> **2.** Kovalchuk V., Demchuk O., Demchuk D., Voitovich O. Data Mining for a Model of Irrigation Control Using Weather Web-Services. In: *Advances in Computer Science for*

Engineering and Education. ICCSEEA 2018 / eds. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 754. Cham: Springer, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_14 **3.** Thalheimer M. A low-cost electronic tensiometer system for continuous monitoring of soil water potential. Journal of Agricultural Engineering, 2013, 44(3), e16. <https://doi.org/10.4081/jae.2013.e16> **4.** 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, 2024, 16(1), 306. <https://doi.org/10.3390/su16010306> **5.** Internet of Things (IoT) for Soil Moisture Tensiometer Automation. Micromachines, 2023, 14(2), 263. <https://doi.org/10.3390/mi14020263> **6.** Kovalchuk V., Voitovich O., Demchuk D., Demchuk O. Development of Low-Cost Internet-of-Things (IoT) Networks for Field Air and Soil Monitoring Within the Irrigation Control System. In: Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020 / eds. Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1247. Cham: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_8 <https://doi.org/10.52305/UQGT5734> **7.** Song J. J., Zhu Y. L. Environment monitoring system for precise agriculture based on wireless sensor network. Applied Mechanics and Materials, 2014, vol. 475, pp. 127–131. **8.** Khan F., Shabbir F., Tahir Z. A fuzzy approach for water security in irrigation system using wireless sensor network. Science International, 2014, 26(3). **9.** Villarrubia G., De Paz J. F., De la Iglesia D. H., Bajo J. Combining multi-agent systems and wireless sensor networks for monitoring crop irrigation. Sensors, 2017, 17(8), 1775. <https://doi.org/10.3390/s17081775> **10.** Reliability Analysis of Wireless Sensor Network for Smart Farming Applications. Sensors, 2021, 21(22), 7683. <https://doi.org/10.3390/s21227683> **11.** Monitoring Soil and Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Original Modeling Approach Dedicated to Low-Cost Soil Water Content Sensors. Sensors, 2021, 21(15), 5110.

Demchuk D. O., (1:ORCID: 0000-0003-0156-0299)

postgraduate student

Demchuk O. S., (2: ORCID: 0000-0002-8318-5009)

candidate of technical sciences (Ph. D.), docent, associate professor

¹ Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS of Ukraine, Kyiv

¹ National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

ANALYSIS OF DATA TRANSMISSION FAILURES OF AN AUTOMATIC SOIL MOISTURE MONITORING STATION AND THE EFFECTIVENESS OF MEASUREMENT BUFFERING

Decision support systems in irrigation management rely on a feedback loop. A soil water potential reading moves from the sensor to the database through the station controller, a cellular link, and a server-side receiver. The properties of the entire chain determine the availability of such a system rather than the accuracy of an individual sensor. For low-cost Internet of Things solutions, it is documented far less thoroughly than the metrological characteristics of the sensors themselves.

Two in-house stations operated over two growing seasons yielded a completeness ratio of 0.508 for the observation series, and this ratio remained essentially unchanged between years. Decomposing losses by nature shows that 44.1 % of expected transmissions were attributable to extended outages and 5.0 % to isolated dropouts; these components require different countermeasures.

The principal result identifies the conditions under which on-device buffering improves reliability. Buffering is effective only when the server issues the acknowledgement after committing the record to the database. We observed the opposite. The error handler of the server-side script returned a success code, and the device therefore released its buffer; a mechanism designed to improve reliability produced guaranteed data loss without external indication. We propose requirements for the acknowledgement protocol that preclude this behaviour.

Keywords: soil moisture monitoring; automatic tensiometer; Internet of Things; data transmission reliability; buffering; availability ratio; decision support system; irrigation.

Отримано: 30 березня 2026 року
Прорецензовано: 1 травня 2026 року
Прийнято до друку: 29 травня 2026 року



© 2026 [Demchuk D. O., Demchuk O. S.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license ([creativecommons.org](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).