

6. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-Term Memory. *Neural Computation*. 1997. Vol. 9, no. 8. P. 1735-1780.
URL: <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.

Крохін Д. П.,

здобувач вищої освіти спеціальності F3 Комп'ютерні науки

Науковий керівник: Пархоменко О. Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедри економічної кібернетики, комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Миколаївський національний аграрний університет
м. Миколаїв

ТЕХНОЛОГІЇ EDGE-COMPUTING ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ СИСТЕМ ПОЛИВУ НА ОСНОВІ ДАНИХ З ДАТЧИКІВ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується активним впровадженням цифрових технологій, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів та забезпечення сталого розвитку. Одним із ключових напрямів є автоматизація систем поливу, яка базується на використанні сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів управління. Особливе місце у цьому контексті займає концепція edge-computing, що передбачає перенесення обчислювальних потужностей ближче до джерела даних. Такий підхід дозволяє мінімізувати затримки, знизити навантаження на мережу та забезпечити автономність роботи систем навіть за умов нестабільного інтернет-з'єднання.

Актуальність застосування edge-computing у системах зрошення зумовлена необхідністю оперативного реагування на зміни вологості ґрунту, що безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин. Традиційні системи поливу, які працюють за фіксованими графіками, не враховують динамічних змін природного середовища, що призводить до нераціонального використання водних ресурсів. Натомість системи, оснащені датчиками вологості ґрунту та edge-пристроями, здатні в режимі реального часу аналізувати стан ґрунту та приймати рішення щодо доцільності поливу. Це дозволяє уникнути як пересушування, так і перезволоження ґрунту, що є критично важливим для забезпечення оптимальних умов росту рослин.

Функціонування таких систем базується на інтеграції кількох технологічних компонентів. По-перше, це сенсорна мережа, яка здійснює безперервний моніторинг параметрів ґрунту. Найбільш поширеними є ємнісні та резистивні датчики вологості, які забезпечують достатню точність вимірювань при відносно низькій вартості. По-друге, це edge-контролери, які виконують обробку даних безпосередньо на місці їх збору. Завдяки цьому зменшується обсяг переданих даних та підвищується швидкість реагування системи. По-третє, це виконавчі механізми, зокрема електромагнітні клапани, які реалізують команди на полив.

Використання edge-computing дозволяє реалізувати складні алгоритми обробки даних без необхідності постійного підключення до хмарних сервісів.

Зокрема, алгоритми машинного навчання можуть бути адаптовані для роботи на малопотужних пристроях, що відкриває можливість прогнозування змін вологості ґрунту на основі історичних даних. Крім того, застосування нечіткої логіки дозволяє враховувати невизначеність та варіативність природних умов, що є характерною рисою аграрного середовища. У результаті система здатна приймати більш гнучкі та адаптивні рішення щодо поливу, враховуючи не лише поточні значення вологості, але й інші фактори, такі як температура повітря, тип ґрунту та стадія розвитку рослин [1].

Однією з ключових переваг edge-підходу є зниження енергоспоживання та підвищення надійності системи. Крім того, у разі втрати зв'язку з центральним сервером система продовжує функціонувати автономно, що забезпечує безперервність процесу зрошення. Це є суттєвою перевагою порівняно з традиційними централізованими системами, які повністю залежать від доступності мережевої інфраструктури.

Практичні дослідження підтверджують ефективність використання edge-computing у системах автоматизованого поливу. Зокрема, впровадження сенсорних мереж дозволяє значно зменшити витрати води без зниження врожайності культур. Це досягається завдяки точному визначенню моменту поливу та оптимального обсягу води, необхідного для підтримання заданого рівня вологості ґрунту [2]. Крім того, використання геоінформаційних систем для оптимізації розміщення датчиків дозволяє підвищити точність моніторингу та забезпечити більш ефективне управління поливом на рівні окремих ділянок поля [3].

Таблиця 1. Основні компоненти та характеристики edge-системи автоматизованого поливу

Компонент	Основна функція	Технологічні особливості	Переваги
Датчики вологості ґрунту	Вимірювання рівня вологості	Ємнісні, резистивні сенсори	Низька вартість, висока доступність
Edge-контролер	Локальна обробка даних	Мікроконтролери (ESP32, Raspberry Pi)	Швидкість, автономність
Комунікаційний модуль	Передача даних	LoRa, ZigBee, Wi-Fi	Енергоефективність, гнучкість
Виконавчі пристрої	Реалізація поливу	Електромагнітні клапани	Точність виконання команд
Аналітична платформа	Довгостроковий аналіз	Хмарні IoT-сервіси	Масштабованість, зберігання даних

Для реалізації інтелектуального керування поливом на edge-пристроях доцільно використовувати легковагі алгоритми машинного навчання, зокрема моделі типу TinyML, які оптимізовані для роботи на мікроконтролерах із обмеженою пам'яттю (до 256 КБ) та низьким енергоспоживанням. Типовий алгоритм роботи edge-контролера включає наступні етапи: зчитування показань датчиків вологості кожні 5–15 хвилин, фільтрація сигналу ковзним середнім для

усунення випадкових викидів, порівняння отриманого значення з верхнім та нижнім порогами, налаштованими для конкретного типу ґрунту та культури. Якщо вологість опускається нижче заданого мінімуму (наприклад, 45% від повної польової вологості), контролер надсилає сигнал на відкриття клапана поливу. Після досягнення верхнього порогу (наприклад, 70%) клапан закривається. Більш складні алгоритми можуть також враховувати прогноз погоди (отриманий через LoRaWAN), що дозволяє уникати поливу перед дощем, а також адаптувати пороги залежно від фенологічної фази розвитку рослин (наприклад, у період цвітіння потреба у волозі є критичною).

За даними польових випробувань, використання edge-систем автоматизованого поливу дозволяє скоротити витрати води на 25–40% порівняно з традиційним зрошенням за графіком. Економія електроенергії (на насосах) досягає 15–20%. При цьому врожайність не лише не знижується, але часто зростає на 8–12% завдяки оптимальному водному режиму в критичні фази росту. Термін окупності системи (враховуючи вартість датчиків, контролерів та клапанів) зазвичай становить 1–2 поливні сезони для господарств площею від 50 га. Важливим аспектом є також масштабованість таких систем. Завдяки модульній архітектурі edge-рішень можливе поступове розширення системи шляхом додавання нових сенсорів та контролерів. Це дозволяє адаптувати систему до змін у структурі господарства або впроваджувати її поетапно, зменшуючи початкові інвестиції. Крім того, використання стандартних протоколів зв'язку, таких як LoRa, ZigBee або Wi-Fi, забезпечує сумісність між різними компонентами системи та спрощує її інтеграцію з іншими цифровими платформами.

Отже, застосування технологій edge-computing у системах автоматизованого поливу на основі даних з датчиків вологості ґрунту є перспективним напрямом розвитку сучасного сільського господарства. Воно забезпечує підвищення ефективності використання водних ресурсів, зниження витрат та покращення екологічної стійкості агровиробництва. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів локальної обробки даних, підвищення точності сенсорів та інтеграцію з іншими елементами цифрового землеробства, що в сукупності сприятиме формуванню інтелектуальних аграрних систем нового покоління [4].

Список використаних джерел

1. Implementation of an in-field IoT system for precision irrigation management / Y. Dong et al. *Frontiers in Water*. 2024. Vol. 6. URL: <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1353597>.
2. Design and validation of a soil moisture-based wireless sensors network for the smart irrigation of a pear orchard / F. Hamouda et al. *Agricultural Water Management*. 2024. Vol. 305. P. 109138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109138>.
3. Improving the spatial deployment of the soil moisture sensors in smart irrigation systems using GIS / Y. Arafa et al. *Cogent Food & Agriculture*. 2024. Vol. 10, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2361124>.

4. Fuzzy automatic control of the irrigation process for the IoT-based smart farming systems / Y. Zheng et al. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*. 2024. P. 1-27. URL: <https://doi.org/10.3233/ais-230403>.

Кушнір Л. В.,
здобувач вищої освіти спеціальності
072 Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок
Нестерук Г. В.,
викладач циклової комісії фінансів, обліку і оподаткування,
ВСП «Хмельницький торговельно-економічний фаховий коледж
ДТЕУ»
м. Хмельницький

ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В КОНТЕКСТІ СТРАТЕГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ

На сучасному етапі розвитку світової цивілізації питання продовольчої безпеки перейшло з розряду суто аграрних проблем у площину національної безпеки та технологічного суверенітету кожної держави [1, с. 45].

Саме тому цифрова трансформація стає ключовим шляхом розвитку сучасної економіки [1, с. 50]. Впровадження інноваційних інформаційних систем дозволяє побудувати модель «розумного» виробництва та розподілу, де кожен крок супроводжується точним збором та аналізом великих масивів даних [2, с. 25]. Використання сучасного програмного забезпечення мінімізує вплив людського фактору, суттєво зменшує витрати сировини та дозволяє оперативно реагувати на будь-які загрози дефіциту [1, с. 52]. Метою є детальний розгляд найбільш ефективних цифрових інструментів, що стоять на варті продовольчої безпеки, та аналіз їхніх переваг над застарілими моделями управління [2, с. 28].

Цифрові технології:

1. Система «Сторіо». Це провідна платформа для дистанційного керування підприємствами, що забезпечує супутниковий моніторинг полів та контроль техніки у режимі реального часу [1, с. 88]. Програма інтегрує супутникові знімки, дані метеостанцій та телеметрію з датчиків [2, с. 108]. Вона автоматично обчислює вегетаційні індекси і виявляє аномалії в розвитку рослин на ранніх стадіях [1, с. 92]. Приклад: На звичайному підприємстві агроном витрачає тижні на об'їзд територій, часто пропускаючи осередки хвороб [2, с. 110]. У системі «Сторіо» сповіщення про проблему приходять миттєво на мобільний пристрій [2, с. 112]. Завдяки швидкому реагуванню економія палива становить 15%, а врожай зберігається у повному обсязі [1, с. 97; 2, с. 115].

2. WMS-системи управління складами. Управління запасами готової продукції вимагає високої точності, яку забезпечують сучасні WMS-системи [1, с. 120]. Вони дозволяють повністю контролювати кожну одиницю товару, автоматизувати розміщення на складах та виключити людські помилки [1, с.