Янко Аліна Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<https://orcid.org/0000-0003-2876-9316>

Гончаренко Станіслав Олександрович,

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<https://orcid.org/0009-0009-3417-6198>

**ОПТИМІЗАЦІЯ LORAWAN-МЕРЕЖ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ УКРАЇНИ: ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ**

**Вступ**. В умовах зростаючої потреби в ефективному та сталому сільському господарстві, LoRaWAN виступає як ключова технологія, що дозволяє оптимізувати процеси в аграрному секторі України. Це технологія бездротового зв’язку, яка використовується для створення енергоефективних мереж з великою зоною покриття [1]. Основними перевагами LoRaWAN є низьке енергоспоживання, можливість передачі даних на великі відстані, до десятків кілометрів, а також підтримка великої кількості кінцевих пристроїв (~500 пристроїв на один шлюз LoRaGateway) [2]. LoRaWAN мережі розраховані на інфраструктуру, яка включає кінцеві пристрої користувачів такі як сенсори, датчики, актуатори, шлюзи для обміну трафіком клієнта та мережеві сервери і сервери додатків. Її здатність забезпечувати зв'язок на великі відстані з низьким енергоспоживанням робить її ідеальною для моніторингу сільськогосподарських угідь, контролю обладнання та збору даних у важкодоступних місцях, де традиційні рішення, такі як Wi-Fi або мобільний зв'язок, є недоцільними або економічно невигідними [3]. Актуальність дослідження полягає в необхідності адаптації та оптимізації LoRaWAN-мереж для специфічних потреб аграрного сектору, що сприятиме підвищенню продуктивності, зниженню витрат та сталому розвитку сільського господарства.

З огляду на зростаючу популярність LoRaWAN, важливо розуміти основні рекомендації та підходи до її налаштування та експлуатації. Робота LoRaWAN мережі регламентується організацією LoRa Alliance [4], яка розробляє стандарти та надає детальну документацію з усіх аспектів мережевої роботи. Одним із ключових документів є TR007, що містить детальні рекомендації щодо налаштування та управління LoRaWAN мережею [5].

**Методологія**. Дослідження базується на аналізі рекомендацій LoRa Alliance, зокрема документу TR007 [4-7], та практичному досвіді розгортання LoRaWAN-мереж в аграрному секторі. Використано методи системного аналізу, моделювання та експериментальні дослідження для оцінки ефективності різних підходів до налаштування та оптимізації мережі. Дослідження включає в себе аналіз реальних даних з сенсорів, встановлених на сільськогосподарських угіддях, для оцінки якості зв'язку та ефективності використання ресурсів. Аналізувалися такі параметри, як SNR, RSSI, пропускна здатність мережі, а також вплив погодних умов та рельєфу місцевості на якість зв'язку [8].

**Оптимізація налаштувань для аграрного сектору:**

* + Використання OTAA для безпечного підключення сенсорів, що дозволяє уникнути ручної конфігурації великої кількості пристроїв, що є критично важливим в умовах великих сільськогосподарських угідь.
	+ Адаптація частотного плану та каналів для забезпечення стабільного зв'язку в умовах сільської місцевості, де можуть бути присутні перешкоди та обмеження.
	+ Впровадження механізмів динамічного регулювання потужності (ADR) для оптимізації енергоспоживання сенсорів, що дозволяє продовжити термін їх служби та зменшити витрати на обслуговування.
	+ Налаштування сенсорів для збору даних, специфічних для аграрного сектору, таких як вологість ґрунту, температура, освітленість, рівень pH та інші показники, що впливають на врожайність.

**Аналіз ефективності:**

* + Оцінка якості зв'язку (SNR, RSSI) та пропускної здатності мережі в різних умовах, включаючи різні типи ґрунтів, погодні умови та рельєф місцевості.
	+ Визначення оптимальних параметрів для передачі даних з сенсорів, що використовуються для моніторингу вологості ґрунту, температури та інших показників, з метою забезпечення максимальної точності та надійності даних.
	+ Аналіз впливу погодних умов та рельєфу місцевості на якість зв'язку, що дозволяє розробити стратегії для мінімізації впливу негативних факторів.
	+ Аналіз енергоефективності сенсорів та шлюзів, з метою оптимізації витрат на електроенергію та продовження терміну служби обладнання.

**Практичні рекомендації:**

* + Вибір оптимального розташування шлюзів для забезпечення максимального покриття сільськогосподарських угідь, враховуючи рельєф місцевості та можливі перешкоди.
	+ Використання сенсорів з низьким енергоспоживанням та високою точністю вимірювань для тривалої роботи від батареї та отримання достовірних даних.
	+ Впровадження системи моніторингу та аналізу даних для оперативного реагування на зміни в умовах вирощування та прийняття своєчасних рішень.
	+ Використання хмарних платформ для зберігання, обробки та аналізу даних, що дозволяє отримувати доступ до інформації з будь-якого місця та пристрою.
	+ Інтеграція LoRaWAN-мережі з іншими системами управління сільським господарством, такими як системи GPS-навігації, системи автоматичного поливу та інші.

**Висновки**. LoRaWAN є ефективною технологією для застосування в аграрному секторі України, але вимагає адаптації та оптимізації для забезпечення стабільного та надійного зв'язку. Результати дослідження показують, що правильне налаштування мережі та використання оптимальних параметрів дозволяє підвищити ефективність моніторингу та контролю сільськогосподарських угідь, що сприяє підвищенню врожайності та зниженню витрат. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку інтелектуальних систем управління на основі LoRaWAN, що дозволить автоматизувати процеси та підвищити продуктивність аграрного сектору, а також на розробку спеціалізованих сенсорів та обладнання для аграрного сектору.

**Література**

1. Cordova L., & et al. Energy-Efficient LoRaWan Communication: Real-Time Applications in Aquaculture. *2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Beijing, China, 2024, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/INDIN58382.2024.10774297>
2. The Things Network, “What are LoRa and LoRaWAN?,” The Things Network. Available at: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (accessed 02.03.2025).
3. Katsoulis S., Koulouras G., & Christakis I. Energy-Efficient Data Acquisition and Control System using both LoRaWAN and Wi-Fi Communication for Smart Classrooms. *2024 13th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, Sofia, Bulgaria, 2024, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/MOCAST61810.2024.10615862>
4. Kjendal D. LoRa-Alliance Regional Parameters Overview. *Journal of ICT Standardization*, 9(1), 2021, pp. 35–46. <https://doi.org/10.13052/jicts2245-800X.914>
5. TR007 Developing LoRaWAN® Devices v1.0.0, “TR007 Developing LoRaWAN Devices v1.0.0,” Lora-alliance.org, Feb. 03, 2021. Available at: <https://resources.lora-alliance.org/document/tr007-developing-lorawan-devices-v1-0-0> (accessed 04.03.2025).
6. LoRa Alliance, TR007-1.0.0 Developing LoRaWAN Devices, 2021, sec. 3.1.2. [Online]. Available at: <https://resources.lora-alliance.org/document/tr007-developing-lorawan-devices-v1-0-0> (accessed 28.02.2025).
7. LoRa Alliance, TR007-1.0.0 Developing LoRaWAN Devices, 2021, sec. 3.2.2. [Online]. Available at: <https://resources.lora-alliance.org/document/tr007-developing-lorawan-devices-v1-0-0> (accessed 05.03.2025).
8. Aldhaheri L., Alshehhi N., Manzil I., Khalil R.A., Javaid S., Saeed N., & Alouini M.-S. LoRa Communication for Agriculture 4.0: Opportunities, Challenges, and Future Directions, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.11200>