

означає збереження кожної п'ятої–шостої тонни зерна, яка інакше була б втрачена.

Автоматизовані системи управління мікрокліматом є економічно вигідним рішенням. Скорочення втрат зерна на 30–50% збільшує обсяг продукції для реалізації, зниження енергоспоживання досягається завдяки оптимізації роботи обладнання, а автоматичний моніторинг дозволяє зменшити витрати на ручну працю. Сукупність цих факторів забезпечує окупність інвестицій приблизно за два роки, після чого система стабільно знижує витрати та підвищує прибутковість підприємства.

В умовах сучасного агровиробництва України автоматизація контролю мікроклімату є критично необхідною умовою для збереження врожаю та забезпечення рентабельності галузі. Високий рівень втрат зерна (до 30%) не є технологічно обумовленим, а виникає внаслідок низької ефективності традиційного ручного моніторингу, що успішно вирішується впровадженням автоматизованих комплексів. Впровадження автоматизованих систем дозволяє перейти до превентивного управління. Замість усунення наслідків – запобігання самій проблемі.

Список використаних джерел

1. Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі Матеріали VII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції 03-28 листопада 2025 р. (Запоріжжя 2025)
2. Системи виробництва і застосування засобів біологізації землеробства Монографія (Київ, аграрна наука, 2022)
3. Збірник наукових праць V Всеукраїнської науково-практичної інтернет конференції (24 червня 2025 року м. Полтава)
4. Міжнародної науково-практичної конференції «інноваційні розробки в аграрній сфері» (28-29 листопада 2018 року)

Урсу Д. О.,

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

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НЕВЗАЄМОДІЮЧИХ ДОКАЗІВ З НУЛЬОВИМ РОЗГЛОШЕННЯМ (ZERO-KNOWLEDGE PROOFS) ДЛЯ ЗАХИСТУ ДАНИХ ФЕРМЕРІВ У ЛАНЦЮГАХ ПОСТАЧАННЯ

У сучасних умовах цифрової трансформації аграрного сектору України особливої актуальності набуває проблема захисту конфіденційної інформації фермерських господарств. Ланцюги постачання сільськогосподарської продукції охоплюють велику кількість учасників: виробників, логістичні компанії, переробні підприємства, торговельні мережі, сертифікаційні органи та державні

контролюючі установи. У процесі взаємодії між цими суб'єктами здійснюється постійний обмін даними щодо обсягів урожаю, якості продукції, місця її походження, умов транспортування, фінансових операцій та сертифікації.

Разом із тим відкритість інформаційних потоків створює значні ризики витоку комерційно важливої інформації. Для фермерських господарств це може означати розголошення виробничих показників, собівартості продукції, маршрутів постачання, відомостей про контрагентів та інших даних, що становлять економічну цінність.

Одним із сучасних інструментів вирішення цієї проблеми є технологія невзаємодіючих доказів з нульовим розголошенням (Zero-Knowledge Proofs, ZKP) [1]. Її сутність полягає у можливості доведення істинності певного твердження без розкриття самої інформації, на основі якої це твердження сформоване. Наприклад, фермер може довести, що продукція відповідає стандартам органічного виробництва, не передаючи повний технологічний журнал вирощування.

Основною перевагою технології ZKP є забезпечення високого рівня конфіденційності при збереженні довіри між учасниками ланцюга постачання. Це особливо важливо в аграрній сфері, де дані про площі посівів, врожайність, використання добрив, засобів захисту рослин та логістичні схеми є критично важливими для конкурентоспроможності підприємства.

У ланцюгах постачання продовольчої продукції технологія Zero-Knowledge Proofs може застосовуватися для підтвердження автентичності та походження продукції без розкриття повних даних про виробництво, захисту фінансових транзакцій між фермерами, постачальниками та покупцями, перевірки сертифікації й відповідності встановленим стандартам якості, а також для забезпечення конфіденційності логістичних маршрутів і даних про транспортування [1]. Завдяки цьому кожен учасник ланцюга постачання має можливість перевірити достовірність необхідної інформації, не отримуючи доступу до комерційно чутливих відомостей, що значно знижує ризик витоку даних та підвищує рівень довіри між сторонами.

Водночас впровадження технології Zero-Knowledge Proofs супроводжується низкою практичних викликів. До основних з них належать висока обчислювальна складність криптографічних операцій, що може впливати на продуктивність систем у масштабних ланцюгах постачання. Крім того, інтеграція ZKP у вже існуючі інформаційні системи аграрних підприємств потребує значних ресурсів та спеціалізованих знань у сфері криптографії та розробки блокчейн-рішень. Також важливим аспектом є необхідність стандартизації підходів до реалізації таких протоколів для забезпечення сумісності між різними учасниками ланцюга постачання [2].

Таблиця 1. Порівняння традиційного захисту даних та Zero-Knowledge Proofs

Критерій	Традиційний підхід	Zero-Knowledge Proofs
Розкриття даних	Повне або часткове	Без розкриття змісту
Рівень конфіденційності	Середній	Високий

Перевірка достовірності	Через документи	Криптографічний доказ
Захист комерційної таємниці	Обмежений	Максимальний
Ризик витоку інформації	Високий	Мінімальний

Особливо ефективним є поєднання ZKP із технологією блокчейн. Блокчейн забезпечує незмінність, прозорість та відстежуваність усіх операцій у ланцюгу постачання, тоді як Zero-Knowledge Proofs дозволяє зберігати конфіденційність даних. У результаті формується система, де учасники можуть перевірити достовірність інформації без отримання доступу до її змісту [2,4].

Серед різноманітних реалізацій ZKP найбільш перспективними для використання в аграрних ланцюгах постачання є протоколи на основі zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Arguments of Knowledge) та zk-STARKs (Zero-Knowledge Scalable Transparent Arguments of Knowledge). zk-SNARKs характеризуються малим розміром доказу (до кількох сотень байт) та високою швидкістю перевірки (мілісекунди), що робить їх придатними для систем із обмеженими обчислювальними ресурсами. Однак вони потребують довіри до етапу початкової конфігурації (trusted setup). Натомість zk-STARKs не потребують довіри до початкових параметрів, є стійкими до квантових атак, але мають більший розмір доказу (десятки кілобайт), що може бути обмеженням при роботі з великими обсягами даних. Для більшості агропродовольчих ланцюгів постачання оптимальним вибором є використання zk-SNARKs завдяки їхній ефективності, особливо якщо система розгортається в межах довіреної групи учасників (наприклад, кооперативу фермерів або галузевої асоціації) [3].

Існуючі дослідження демонструють успішні приклади використання ZKP для захисту даних фермерів. Зокрема, запропоновано схеми математичних стимулів для фермерів у системах на основі ZKP, де учасники отримують винагороду за надання достовірних доказів щодо своїх виробничих показників без розкриття повної інформації [3]. Це створює економічні механізми, які заохочують чесну поведінку та підвищують загальну надійність системи. Інший важливий напрям – інтеграція ZKP із концепцією децентралізованої ідентифікації (Self-Sovereign Identity, SSI). У такій моделі кожен фермер отримує цифрову ідентифікацію, яка належить виключно йому, а ZKP використовується для вибіркового розкриття атрибутів (наприклад, доведення, що вік господарства перевищує 5 років, без вказання точної дати реєстрації) [4].

Для України така технологія має особливе значення в умовах розвитку цифрових платформ в аграрному секторі, систем електронного документообігу та цифрового моніторингу ланцюгів постачання. Її впровадження сприятиме підвищенню довіри до української агропродукції на внутрішньому та зовнішньому ринках, а також посиленню інформаційної безпеки фермерських підприємств.

Подальший розвиток технології Zero-Knowledge Proofs у аграрному секторі України пов'язаний із її поєднанням із сучасними цифровими рішеннями, зокрема блокчейн-платформами, системами Інтернету речей (IoT) та технологіями точного землеробства. Така інтеграція дозволить створити

комплексні системи відстеження продукції «від поля до споживача» з одночасним збереженням конфіденційності критично важливих даних. У перспективі це також сприятиме гармонізації українських практик із європейськими вимогами щодо простежуваності та безпечності харчових продуктів, що підвищить конкурентоспроможність вітчизняної агропродукції на міжнародних ринках [2].

Отже, використання технології невзаємодіючих доказів з нульовим розголошенням є перспективним напрямом розвитку систем захисту даних у ланцюгах постачання аграрної продукції. Її застосування дозволяє забезпечити баланс між прозорістю процесів, достовірністю інформації та захистом комерційної таємниці фермерських господарств, що є важливим елементом цифрової трансформації аграрного сектору та системи продовольчої безпеки.

Список використаних джерел

1. Arade M. S., Pise N. N. Improve the authentication of agricultural food supply chain using Permutations Supersonic Liger Elliptic Signature Algorithm. *International Journal of Food Properties*. 2025. Vol. 28, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/10942912.2025.2559056>.

2. Digitalization and Blockchain Integration in Agri-Food Supply Chains: Towards a Resilient, Circular, and Sustainable Future / S.-G. Stanescu et al. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 20. P. 9276. URL: <https://doi.org/10.3390/su17209276>.

3. Singhal P., Joshi N. Designing Mathematical Incentive Mechanisms to Encourage Farmers in a ZKP-Based System. *Engineering Research Express*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1088/2631-8695/adf8b6>.

4. Evaluating self-sovereign identity solutions for agricultural supply chains: a systematic review / T. Alar et al. *Frontiers in Blockchain*. 2026. Vol. 8. URL: <https://doi.org/10.3389/fbloc.2025.1672752>.

Чеботарьова А. М.,

здобувачка вищої освіти спеціальності D3 Менеджмент

Науковий керівник: Співак В. В., асистент кафедри економічної кібернетики,
комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Миколаївський національний аграрний університет,
м. Миколаїв

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ У СУЧАСНОМУ АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

Використання інформаційних систем у сучасному агропромисловому комплексі є одним із ключових напрямів цифрової трансформації аграрного сектору. Сучасне сільське господарство активно інтегрує цифрові технології для підвищення продуктивності, зниження виробничих витрат та оптимізації використання природних ресурсів. Інформаційні системи забезпечують автоматизацію процесів управління аграрними підприємствами, збір та обробку