

DOI: 10.32347/2412-9933.2025.62.170-176

УДК 004.738.5:656.07

Рябчун Юлія Володимирівна

Докторка філософії, доцентка кафедри інформаційних технологій,

<https://orcid.org/0000-0002-8320-4038>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Компанець Денис Сергійович

Здобувач вищої освіти кафедри інформаційних технологій,

<https://orcid.org/0009-0002-2610-5129>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Хроленко Володимир Миколайович

Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій

<https://orcid.org/0009-0007-2157-2023>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

Попович Наталія Леонтіївна

Кандидатка технічних наук, доцентка, доцентка кафедри інформаційних технологій,

<https://orcid.org/0000-0002-0485-8464>

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЙ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЦІЛІСНОСТІ ДАНИХ У ЛОГІСТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. У статті визначено доцільність застосування блокчейн-технології для забезпечення цілісності даних у цифрових логістичних системах. Актуальність теми зумовлена потребою в надійності та прозорості даних в умовах зростаючої складності ланцюгів постачання, де недостатня довіра між учасниками, затримки в обміні інформацією та можливі фальсифікації негативно впливають на ефективність логістичних процесів. Розглянуто концептуальні основи блокчейну як технології децентралізованого реєстру транзакцій, що забезпечує незмінність, доступність та верифікованість даних за допомогою криптографії та механізмів консенсусу. Особливу увагу приділено аналізу практичного кейсу впровадження блокчейн-рішення для відстеження поставок, де кожен етап логістичного процесу фіксується в захищеному реєстрі з використанням смарт-контрактів. Запропоновано узагальнену архітектуру системи, що демонструє, як ключові учасники ланцюга технологічного рішення – постачальники, перевізники, склади, ритейлери — взаємодіють між собою через блокчейн-платформу. Проведено порівняльний аналіз з традиційними централізованими системами управління даними, а також з альтернативними підходами до забезпечення цілісності, зокрема із застосуванням хешування та контрольних механізмів. Також охарактеризовано криптографічні інструменти, що становлять методологічну основу блокчейн-технології: геши-функції, дерева Меркла, принципи роботи смарт-контрактів. Результати дослідження підтверджують, що блокчейн-технології можуть суттєво підвищити безпеку, прозорість і достовірність логістичних даних. У висновках окреслено переваги застосування блокчейн-технологій в логістиці та визначено перспективні напрямки подальших досліджень, пов'язані з масштабованістю та продуктивністю таких рішень.

Ключові слова: блокчейн; цілісність даних; логістика; ланцюг поставок; прозорість; розподілений реєстр; смарт-контракт; Merkle tree

Вступ

У цифрових логістичних системах забезпечення цілісності даних відіграє ключову роль, оскільки від достовірності інформації залежить ефективність координації між усіма учасниками ланцюга постачання. Однак традиційні логістичні платформи часто стикаються з проблемами довіри, прозорості та

контрольованості обміну даними. Учасники логістичних процесів нерідко не впевнені в достовірності отриманої інформації, що ускладнює співпрацю та знижує загальну ефективність функціонування системи.

Складність логістичних процесів, які охоплюють численні етапи й організації, зумовлює високу чутливість до помилок та спотворення даних.

Відсутність єдиного надійного джерела правдивої інформації призводить до розбіжностей, затримок у постачанні, помилкових управлінських рішень. За умови недостатнього контролю над цілісністю даних, інформація про переміщення товарів може бути навмисно або випадково змінена, що спричиняє суттєві ризики – від втрати вантажів до фінансових збитків.

Централізовані бази даних, які переважають у сучасних логістичних платформах, мають низку вразливостей. Вони можуть стати об'єктом хакерських атак або внутрішніх загроз, що вже неодноразово призводило до серйозних економічних втрат і підриву довіри до компаній. Так, згідно з результатами досліджень [1], традиційні системи відстеження холодового ланцюга агропродукції демонстрували низький рівень прозорості та були схильні до фальсифікації записів, що негативно впливало як на логістичну координацію, так і на довіру кінцевих споживачів.

Таким чином, існує нагальна потреба у впровадженні інноваційних технологій, таких як блокчейн, для підвищення прозорості, достовірності та довіри в ланцюгах постачання.

Мета дослідження

Метою дослідження є обґрунтування доцільності використання блокчейн-технологій для забезпечення цілісності даних у цифрових логістичних системах, а також розробка концептуальної моделі застосування блокчейну для відстеження поставок у ланцюгах постачання. У межах дослідження передбачається:

- проаналізувати властивості блокчейн-технологій, які забезпечують незмінність, прозорість і перевірюваність даних;
- вивчити механізми консенсусу, криптографічного захисту й смарт-контрактів у контексті логістичних процесів;
- розглянути практичний кейс інтеграції блокчейну для відстеження матеріальних потоків;
- оцінити переваги та обмеження блокчейн-рішень у порівнянні з традиційними централізованими підходами.

Аналіз основних досліджень і публікацій

Проблематика забезпечення цілісності даних у розподілених системах привертає увагу дослідників з різних галузей. У сфері блокчейн-технологій закладено принципову властивість – незмінність даних після їх додавання в реєстр, яка досягається за рахунок криптографічного зв'язування блоків та консенсусу вузлів мережі. Ще в 1991 році Стюарт Хабер та Скотт Сторнетта запропонували метод

криптографічного штампування (timestamping) записів [2], який став прообразом блокчейну. В їхній моделі послідовність записів формувала ланцюжок з криптографічними хешами, що унеможливлювало непомічене внесення змін. Подальший розвиток ідеї – додавання дерев Меркла (Merkle tree) у 1992 р. – дозволило об'єднувати множину транзакцій у блок із одним інтегральним хешем, що підвищило ефективність перевірки цілісності великого обсягу даних. Зазначені ідеї стали основою першого практичного застосування блокчейну у 2008 році під псевдонімом Сатоші Накамото для криптовалюти Bitcoin [3]. Відтоді концепція блокчейну еволюціонувала і набула застосування в багатьох інших доменах, де важливі довіра та достовірність даних – від фінансових послуг до державного управління і логістики.

У наукових публікаціях останніх років блокчейн у логістиці розглядається як інструмент підвищення простежуваності, прозорості та достовірності інформації в ланцюгах постачання. Наприклад, дослідження Alrakhani & Al-Mashari [4] демонструє, що використання блокчейну у відстеженні продуктів харчування (молоко, м'ясо, риба) забезпечує незмінність записів, пришвидшує трасування та підвищує рівень довіри споживачів. Інтеграція з IoT-пристроями дозволяє автоматизовано збирати дані, мінімізуючи ризик людської помилки або маніпуляцій.

Інші дослідження фокусуються на комбінуванні блокчейну з IoT для автоматичного збору достовірних даних у реальному часі та зменшення участі людини, що ще більше знижує ризик помилок і підробок [5]. Таким чином, література підтверджує: тамперостійкість (стійкість до несанкціонованих змін) блокчейн-систем робить їх привабливими для забезпечення цілісності інформації в логістичних процесах. Звичайно, дослідники також відзначають обмеження та виклики. У роботах [6] відзначаються проблеми масштабованості та продуктивності публічних блокчейнів: досягнення консенсусу між багатьма вузлами уповільнює транзакції і вимагає значних ресурсів. Тому для застосування в корпоративній логістиці часто обирають приватні або консорціумні блокчейни, які можуть жертвувати повною децентралізацією заради вищої швидкодії [7]. Консорціумні блокчейни вже використовуються в логістиці IBM Food Trust, TradeLens [8]. Водночас централізовані системи, традиційно використовувані в логістиці, мають свої недоліки – вони створюють єдину точку відмови, менш стійкі до зломів, і обмежують прозорість, що підриває довіру між учасниками [9]. Деякі сучасні роботи пропонують гібридні моделі з поєднанням переваг блокчейну та централізованих баз даних, прагнучи знайти баланс між цілісністю даних і продуктивністю системи [10].

Загалом аналіз публікацій [11 – 14] показує, що блокчейн визнається перспективним засобом забезпечення цілісності даних, але вибір конкретного рішення (наприклад, таких як публічний vs приватний блокчейн або гібридні підходи) залежить від потреб певної галузі. У сфері логістики наголос робиться на підвищенні прозорості та відстежуваності, де навіть часткова децентралізація (наприклад, консорціум з кількох довірених учасників) може суттєво підвищити якість та валідність даних при збереженні прийнятної швидкості роботи системи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Приклад застосування блокчейн-системи у логістиці постачання

Для ілюстрації розглянемо приклад використання блокчейну в логістиці матеріалів – відстеження ланцюжка постачання товару від виробника до кінцевого роздрібного продавця з фіксацією всіх подій у розподіленому реєстрі. Графічну схему архітектури блокчейн-системи в логістичному середовищі показано на рис. 1.

У традиційному ланцюгу постачання кожна ланка (постачальник сировини, виробник, дистриб'ютор, перевізник, склад, ритейлер) веде власні записи, і узгодження інформації між ними може бути складним. Відсутність єдиного джерела достовірності даних створює «сліпі зони» – якщо виникає затримка чи розбіжність, важко швидко з'ясувати, де сталася помилка. Блокчейн-підхід пропонує натомість єдиний спільний журнал транзакцій, до якого мають доступ всі учасники ланцюга постачання (з необхідними обмеженнями

прав доступу). Кожна подія – від відправлення партії товару зі складу до отримання її магазином – оформлюється як транзакція, що додається в блокчейн і підтверджується всіма учасниками. У результаті утворюється безперервний ланцюжок записів, який відображає історію руху товару.

На рис. 2 показано, як різні учасники взаємодіють через єдину розподілену систему.

1. Постачальник надає виробнику сировину чи компоненти та заносить у систему початкові дані (присвоює партії номер або RFID-мітку для ідентифікації).

2. Виробник після виготовлення продукції генерує у блокчейні запис про випуск товарної партії, додаючи до нього унікальний ідентифікатор (QR-код для простежуваності), який містить інформацію про продукт та його походження.

3. Дистриб'ютор та 3PL-провайдер (логістичний оператор) отримують товар від виробника і відповідають за його зберігання та перевезення; при цьому вони додають транзакції про відправлення вантажу, умови транспортування (температуру, вологість – автоматично з датчиків IoT, якщо є) та час прибуття на проміжні склади.

4. Ритейлер (роздрібна мережа), отримавши товар у свій розподільчий центр чи магазин, фіксує у блокчейні факт приймання товару, а також може оновлювати дані про продаж або переміщення між магазинами.

5. Нарешті, кінцевий покупець за допомогою додатку може відсканувати QR-код на продукті, щоб отримати повну історію його походження: коли і де він був виготовлений, через які склади і в який час транспортувався, скільки часу зайняла доставка, хто був перевізником тощо.

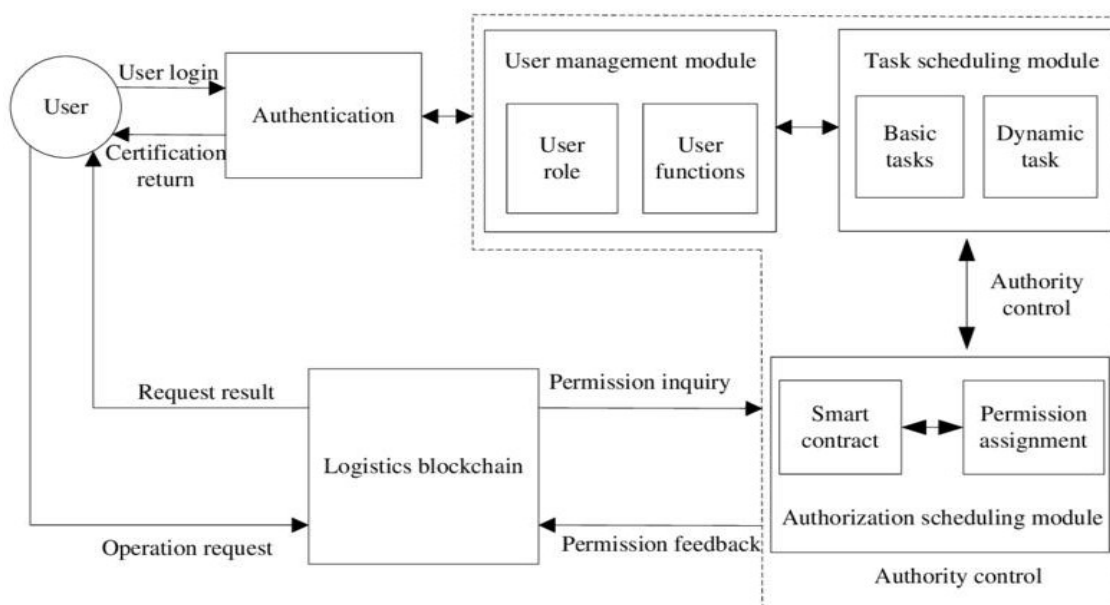


Рисунок 1 – Архітектура блокчейн-системи в логістичному середовищі

END-TO-END SUPPLY CHAIN WITH BLOCKCHAIN TECHNOLOGY

How do we use blockchain in logistics?



Рисунок 2 – Схематична модель наскрізного ланцюга постачання із застосуванням блокчейн-технології

Усі ці дані доступні з розподіленого реєстру, але кожен запис захищений: його не можна підробити або видалити заднім числом. У разі спроби зміни хоча б однієї деталі (наприклад, терміну придатності чи сертифікатів якості) – цифровий підпис і хеш-ланцюжок блокчейну зроблять її відразу помітною та невалідною для інших учасників. У впровадженому кейсі на базі блокчейну досягаються ключові покращення.

По-перше, усувається проблема неузгодженості даних: усі сторони бачать єдину картину руху товару в реальному часі. Це радикально підвищує прозорість: і компанії, і контролюючі органи, і споживачі можуть відслідковувати шлях товару від виробництва до споживання.

По-друге, зникає необхідність у посередниках для перевірки даних – сам технологічний протокол гарантує їх достовірність. Наприклад, аудитор замість вимагати у кожної ланки документи може просто звернутися до блокчейн-реєстру, де зберігається незмінна історія транзакцій. Це спростує і прискорює перевірки, знижує витрати на комплаєнс.

По-третє, підвищується стійкість до шахрайства: кожна транзакція підписана криптографічно і розподілена між багатьма вузлами, тому зловмиснику практично неможливо приховано

внести фальшиві дані чи викривити інформацію на свою користь.

У випадку спроби підміни (наприклад, заміни якісного товару на контрафактний на будь-якому етапі) це одразу буде відображено як невідповідність у ланцюгу блоків, і зацікавлені сторони зможуть відреагувати.

Нарешті, автоматизація за допомогою смарт-контрактів додає ефективності роботі блокчейн-системи: можна налаштувати автоматичне виконання бізнес-правил – наприклад, смарт-контракт, який автоматично здійснить оплату перевізнику після підтвердження доставки товару вчасно та без пошкоджень. Така автоматизація не лише зменшує паперову тяганину, але й усуває людський фактор.

Порівняльний аналіз: блокчейн vs альтернативні підходи

Для оцінки доцільності застосування блокчейну важливо порівняти його з іншими способами забезпечення цілісності даних. Розглянемо два основних альтернативних підходи: використання систем управління базами даних (СУБД) з традиційними методами захисту та застосування контрольних хешів (або журналів аудиту) у централізованих системах (рис. 3).



Рисунок 3 – Порівняння централізованих і блокчейн-підходів до обліку логістичних даних

У традиційних ІТ-системах використовують механізми контролю доступу, журнали змін, цифрові підписи, хешування, резервне копіювання. Однак усі ці інструменти контролюються централізовано – адміністратором або власником системи, що створює ризики внутрішніх зловживань або зламів. У разі компрометації серверу дані можуть бути непомітно змінені, а журнали – стерті. Особливо це критично в багатосторонніх системах, де немає повної довіри між учасниками (наприклад, у логістиці).

Контрольні хеші та журнали аудиту — це дешевий метод фіксації змін: обчислюється хеш записів, який зберігається окремо. У разі невідповідності виявляється факт змін. Проте, якщо контрольні суми зберігаються на тому ж сервері, що й база, зловмисник може підробити і їх. Такий підхід лише дозволяє виявити зміну постфактум, але не запобігає їй.

Блокчейн забезпечує незмінність і валідацію даних завдяки криптографічному хешуванню, розподіленому зберіганню та алгоритмам консенсусу. Відсутність центрального контролера усуває «єдину точку відмови», а публічність або дозвільний доступ до реєстру підвищує довіру між сторонами. Змінити дані без відома мережі майже неможливо. Централізовані бази обробляють тисячі транзакцій за секунду, тоді як блокчейн – повільніший через консенсус. Однак для багатьох бізнес-кейсів продуктивності приватних блокчейн-мереж цілком достатньо. Також можливе комбінування: критичні дані – в блокчейні, решта – в традиційних БД з прив'язкою через хеші («off-chain + on-chain»).

Централізовані рішення прості й швидкі, але вразливі до атак і не створюють спільної довіри. Блокчейн натомість забезпечує високий рівень цілісності без потреби в посередниках. Вибір залежить від контексту: якщо головне – захист від фальсифікацій, блокчейн – переважний варіант.

Забезпечення цілісності: криптографічні методи

Цілісність даних у блокчейні забезпечується через поєднання кількох надійних технологічних механізмів: криптографічне хешування, структури даних типу Merkle tree, протоколи консенсусу та смарт-контракти. Кожен із цих компонентів відіграє важливу роль у гарантуванні того, що дані не можуть бути змінені без помітного втручання, і будь-яка фальсифікація одразу виявляється.

Кожна транзакція та блок у блокчейні проходить через хеш-функцію (SHA-256), яка генерує унікальний цифровий відбиток фіксованої довжини – хеш. Якщо змінити хоча б один біт у вхідних даних, хеш зміниться повністю. Блоки з'єднані між собою через хеші: кожен блок містить хеш попереднього, тому зміна будь-якого блоку порушує весь ланцюг, що буде виявлено мережею.

Усі транзакції всередині блоку формують Merkle-дерево – бінарну структуру, в якій:

- листові вузли – це хеші окремих транзакцій;
- внутрішні вузли – це хеші парних комбінацій хешів нижчого рівня;
- кореневий хеш (Merkle Root) включається у заголовок блоку.

Це дозволяє швидко перевіряти, чи міститься певна транзакція в блоці, без необхідності переглядати всі інші.

Для підтвердження додавання нових блоків у блокчейн використовуються протоколи консенсусу, які узгоджують дії між усіма учасниками мережі. У публічних блокчейнах це:

- Proof of Work (PoW) – потребує розв'язання складної задачі;
- Proof of Stake (PoS) – залежить від частки активів у мережі.

У приватних або консорціумних мережах, зокрема в логістиці, частіше застосовують:

- PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance);
- RAFT.

Ці алгоритми дозволяють досягати згоди без потреби у надвисоких обчислювальних ресурсах, забезпечуючи відмовостійкість системи.

Висновки

Розвиток логістичних систем як складових елементів соціо-економічних і виробничих мегасистем потребує впровадження нових підходів до управління, орієнтованих на підвищення прозорості, достовірності та адаптивності інформаційних потоків. Блокчейн-технології, як частина цифрової трансформації, виступають потужним інструментом забезпечення цілісності даних, децентралізованого контролю та стійкості до зовнішніх і внутрішніх впливів у складних динамічних системах.

Властивості незмінності записів, консенсусного підтвердження подій, а також використання смарт-контрактів створюють передумови для побудови нових парадигм управління – зокрема, децентралізованого, самоорганізованого управління логістичними ланцюгами як складними відкритими системами. Такі властивості блокчейну дозволяють зменшити ентропію інформаційних потоків, забезпечити відстежуваність ресурсів у реальному часі та оптимізувати прийняття управлінських рішень на різних рівнях ієрархії.

У контексті управління розвитком складних систем блокчейн варто розглядати як інфраструктурну технологію, що сприяє формуванню довіри між незалежними агентами системи, підвищенню ефективності координації та зниженню транзакційних витрат. Застосування приватних або консорціумних блокчейн-мереж у межах корпоративних або міжорганізаційних структур є найбільш доцільним з огляду на потребу в керованості, масштабованості та конфіденційності.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на розробку архітектур цифрових екосистем, де блокчейн поєднується з іншими технологіями управління складними системами – IoT, цифровими двійниками, Big Data-аналітикою, штучним інтелектом. Така інтеграція здатна забезпечити самонавчання, адаптивність і стійкість систем управління у нестабільному зовнішньому середовищі.

Таким чином, блокчейн-технологія не є кінцевою метою цифрової трансформації логістичних або управлінських систем, а виступає ключовим компонентом у розвитку інтелектуального, децентралізованого й стійкого управління складними динамічними системами.

Список літератури

1. Sunny J, Undralla N, Madhusudanan Pillai V. Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 150. P. 106895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106895>.
2. Haber S, Stornetta W S. How to Time-Stamp a Digital Document. *Advances in Cryptology-CRYPTO' 90*. Berlin, Heidelberg, 1990. P. 437–455. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-38424-3_32.
3. Merkle R C. A digital signature based on a conventional encryption function. *Advances in Cryptology – CRYPTO'87. Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 293. Springer, Berlin, Heidelberg, 1988. P. 369–378.
4. Nakamoto S. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. 2008. URL: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
5. Alrakhmi M, Al-Mashari M. Enhancing supply chain transparency using blockchain technology: Case of Agri-Food Products. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021. Vol. 12, No 3. P. 456–464. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120353.
6. Francisco K, Swanson D. The supply chain has no clothes: Technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*. 2018. Vol. 2, No 1. Article 2. <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>.
7. Saberi S, Kouhizadeh M, Sarkis J, Shen L. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57, No 7. P. 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>.
8. Casino F, Dasaklis T K, Patsakis C A. Systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*. 2019. Vol. 36. P. 55–81. DOI: 10.1016/j.tele.2018.11.006.
9. Kshetri N. The emerging role of big data in key development issues: Opportunities, challenges, and concerns. *Big Data for Development*. Cambridge University Press, 2018. P. 13–28.
10. Mougayar W. *The Business Blockchain: Promise, Practice, and the Application of the Next Internet Technology*. Wiley, 2016. 180 p.
11. Berezutskyi I, Honcharenko T, Ryzhakova G, Tykhonova O, Pokolenko V, Sachenko I. Methodological approach for choosing type of IT projects. *Management. 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies*. 2024. P. 14–19. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629587>.
12. Ryzhakova G, Honcharenko T, Predun K, Petrukha N, Malykhina O, Khomenko O. Using of fuzzy logic for risk assessment of construction enterprise management system. *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*. 2023. P. 208–213. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223560>.
13. Гончаренко Т А. Застосування BIM-технології для створення інформаційної моделі території під забудову. *Управління розвитком складних систем*. 2018. 33. С. 138–145.
14. Гончаренко Т А. Кластерний метод формування метаданих багатовимірних інформаційних систем для розв'язання задач генерального планування. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 42. С. 93–101. DOI: 10.32347/2412-9933.2020.42.93-101.
15. Chernyshev, D., Dolhopolov, S., Honcharenko, T., Haman, H., Ivanova, T., & Zinchenko, M. (2022). Integration of building information modeling and artificial intelligence systems to create a digital twin of the construction site. In *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 36–39). <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000717>.

Стаття надійшла до редколегії 03.06.2025

Riabchun Yuliia

Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology,
<https://orcid.org/0000-0002-8320-4038>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Kompanets Denys

Master's degree candidate, Department of Information Technology,
<https://orcid.org/0009-0002-2610-5129>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Khrolenko Volodymyr

Ph.D., Associate professor, Associate Professor of the Department of Information Technology,
<https://orcid.org/0009-0007-2157-2023>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

Popovych Nataliya

Ph.D., Associate professor, Associate Professor of the Department of Information Technology,
<https://orcid.org/0000-0002-0485-8464>

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kiev

APPLICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGIES IN ENSURING DATA INTEGRITY IN LOGISTICS SYSTEMS

Abstract. The article examines the feasibility of using blockchain technologies to ensure data integrity in digital logistics systems. The relevance of the topic stems from the need for data reliability and transparency in the context of increasing complexity of supply chains, where insufficient trust among participants, delays in information exchange, and potential falsifications negatively impact the efficiency of logistics processes. The conceptual foundations of blockchain as a decentralized transaction

ledger technology are presented, which ensures immutability, accessibility, and verifiability of data using cryptography and consensus mechanisms. The study particularly focuses on the analysis of a practical case involving the implementation of a blockchain solution for delivery tracking, where each stage of the logistics process is recorded in a secure ledger using smart contracts. A generalized system architecture is proposed, demonstrating how key participants in the supply chain — suppliers, carriers, warehouses, retailers — interact via a blockchain platform. A comparative analysis is conducted with traditional centralized data management systems, as well as with alternative approaches to ensuring data integrity, specifically, through the use of hashing and control mechanisms. Cryptographic tools that form the methodological basis of blockchain technology are also described: hash functions, Merkle trees, and the principles of smart contracts. The study's findings confirm that blockchain technologies can significantly increase the security, transparency, and reliability of logistics data. The conclusions outline the advantages of using blockchain technologies in logistics systems and identify promising areas for further research concerning the scalability and performance of such solutions.

Keywords: blockchain; data integrity; logistics; supply chain; transparency; distributed ledger; smart contract; Merkle tree

References

1. Sunny, J., Undralla, N., & Madhusudanan Pillai, V. (2020). Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration. *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106895>.
2. Haber, S., & Stornetta, W. S. (1990). How to time-stamp a digital document. In *Advances in cryptography-CRYPTO' 90* (pp. 437–455). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-38424-3_32.
3. Merkle, R. C. (1988). A digital signature based on a conventional encryption function. In *Advances in cryptography – CRYPTO'87. Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 293, pp. 369–378). Springer.
4. Nakamoto, S. (2008). *Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system*. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.
5. Alrakhami, M., & Al-Mashari, M. (2021). Enhancing supply chain transparency using blockchain technology: Case of agri-food products. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(3), 456–464. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120353>.
6. Francisco, K., & Swanson, D. (2018). The supply chain has no clothes: Technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*, 2(1), Article 2. <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>.
7. Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57 (7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>.
8. Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. A. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>.
9. Kshetri, N. (2018). The emerging role of big data in key development issues: Opportunities, challenges, and concerns. In *Big Data for Development* (pp. 13–28). Cambridge University Press.
10. Mougayar, W. (2016). *The business blockchain: Promise, practice, and the application of the next internet technology*. Wiley.
11. Berezutskyi, I., Honcharenko, T., Ryzhakova, G., Tykhonova, O., Pokolenko, V., & Sachenko, I. (2024). Methodological approach for choosing type of IT projects. In *Management. 2024 IEEE 4th International Conference on Smart Information Systems and Technologies* (pp. 14–19). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIST61555.2024.10629587>.
12. Ryzhakova, G., Honcharenko, T., Predun, K., Petrukha, N., Malykhina, O., & Khomenko, O. (2023). Using of fuzzy logic for risk assessment of construction enterprise management system. In *2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)* (pp. 208–213). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIST58284.2023.10223560>.
13. Honcharenko, T. A. (2018). Application of BIM technology for creating an information model of the territory for development. *Management of Complex Systems Development*, 33, 138–145.
14. Honcharenko, T. A. (2020). Cluster method of metadata formation of multidimensional information systems for solving general planning problems. *Management of Complex Systems Development*, 42, 93–101. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.42.93-101>.
15. Chernyshev, D., Dolhopolov, S., Honcharenko, T., Haman, H., Ivanova, T., & Zinchenko, M. (2022). Integration of building information modeling and artificial intelligence systems to create a digital twin of the construction site. In *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)* (pp. 36–39). <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000717>.

Посилання на публікацію

APA Riabchun, Yu., Kompanets, D., Khrolenko, V., & Popovych, N. (2025). Application of blockchain technologies in ensuring data integrity in logistics systems. *Management of Development of Complex Systems*, 62, 170–176, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.170-176](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.170-176).

ДСТУ Рябчун Ю. В., Компанець Д. С., Хроленко В. М., Попович Н. Л. Застосування блокчейн-технологій в забезпеченні цілісності даних у логістичних системах. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2025. № 62. С. 170 – 176, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.170-176](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.170-176).