

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук  
(повна назва)

Кафедра Інформаційних управляючих систем  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Дослідження методів оцінювання ефективності блокчейн технології в логістичних інформаційних системах  
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,  
групи ІУСТМ-24-1

Денис КЛИМЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки  
(код і повна назва спеціальності)

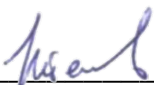
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ІУС Аліна МІХНОВА  
(посада, власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

  
(підпис)

Костянтин ПЕТРОВ  
(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук

Кафедра Інформаційних управляючих систем

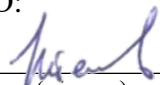
Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки  
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Інформаційні управляючі системи та технології  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри   
(підпис)

« 24 » листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Клименку Денису Павловичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження методів оцінювання ефективності блокчейн технології в логістичних інформаційних системах  
затверджена наказом університету від « 24 » листопада 2025 р. № 1055Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії « 17 » грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи наукова та технічна література з тематики впровадження блокчейн-технологій у логістиці, матеріали передатестаційної практики, статистичні дані та звітність про діяльність хлібоприймального підприємства, джерела інформації про логістичні підприємства, методичні матеріали з аналізу ієрархій та нечіткої логіки
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі аналіз предметної області та сучасного стану логістичних інформаційних систем, огляд існуючих методів оцінювання ефективності ІТ-інвестицій та їх обмежень для блокчейн-рішень, формування вимог до архітектури та функціоналу логістичних систем на базі розподіленого реєстру, розробка комплексного методу багатовимірного синергетичного оцінювання ефективності, розробка системи кількісних та якісних критеріїв оцінювання, розробка алгоритму застосування комплексного методу, експериментальна апробація методу на прикладі хлібоприймального підприємства, аналіз результатів моделювання та сценаріїв впровадження

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	24.11.2025 - 25.11.2025	Виконано
2	Огляд існуючих методів та підходів до оцінювання	25.11.2025 – 27.11.2025	Виконано
3	Постановка задачі дослідження	27.11.2025 – 28.11.2025	Виконано
4	Розробка комплексного методу	28.11.2025 – 02.12.2025	Виконано
5	Застосування комплексного методу	02.12.2025 – 03.12.2025	Виконано
6	Апробація результатів дослідження	03.12.2025 – 05.12.2025	Виконано
7	Аналіз результатів та сценарії впровадження	05.12.2025 – 06.12.2025	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	06.12.2025 – 07.12.2025	Виконано
9	Оформлення графічних матеріалів	07.12.2025 – 07.12.2025	Виконано
10	Захист кваліфікаційної роботи	17.12.2025	Виконано

Дата видачі завдання 24 листопада 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_

  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_

  
(підпис)

доц. каф. ІУС, Аліна МІХНОВА

(посада, власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 91 с., 5 рис., 13 табл., 1 дод., 28 джерел.

HYPERLEDGER FABRIC, ЛАНЦЮГИ ПОСТАЧАННЯ, ЛОГІСТИЧНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, МЕТОД БАГАТОВИМІРНОГО СИНЕРГЕТИЧНОГО ОЦІНЮВАННЯ, ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ, РОЗПОДІЛЕНИЙ РЕЄСТР, СМАРТ-КОНТРАКТИ, ТЕХНОЛОГІЯ БЛОКЧЕЙН.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційного управління та взаємодії в логістичних системах.

Предметом дослідження є методи, моделі та показники, що дозволяють оцінити ефективність цих процесів при використанні технології блокчейн.

Метою роботи є розробка комплексної методики оцінювання ефективності застосування технології блокчейн у логістичних інформаційних системах, яка системно інтегрує кількісні та якісні показники для отримання об'єктивної оцінки впливу технології.

У процесі виконання роботи проведено аналіз предметної області та виявлено обмеження традиційних методів оцінки інвестицій, які не враховують мережеві ефекти та стратегічні переваги розподілених реєстрів. Досліджено архітектурні вимоги до побудови логістичних систем на базі блокчейну та обґрунтовано необхідність використання консорціумних мереж із гібридним зберіганням даних.

Розроблено метод багатовимірною синергетичного оцінювання, що базується на декомпозиції поняття ефективності на операційний, економічний, стратегічний та сталий вектори. Створено алгоритм, який поєднує метод аналізу ієрархій для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв та апарат нечіткої логіки для формалізації якісних показників довіри й репутації.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification paper contains: 91 p., 5 fig., 13 tabl., 1 append., 25 sources.

BLOCKCHAIN TECHNOLOGY, DISTRIBUTED LEDGER, EFFICIENCY ASSESSMENT, HYPERLEDGER FABRIC, LOGISTICS INFORMATION SYSTEM, MULTIDIMENSIONAL SYNERGISTIC ASSESSMENT METHOD, SMART CONTRACTS, SUPPLY CHAINS.

The object of the study is the processes of information management and interaction in logistics systems.

The subject of the study is the methods, models, and indicators that allow for assessing the efficiency of these processes when using blockchain technology.

The purpose of the work is to develop a comprehensive methodology for assessing the efficiency of applying blockchain technology in logistics information systems, which systematically integrates quantitative and qualitative indicators to obtain an objective assessment of the technology's impact.

During the execution of the work, an analysis of the subject area was conducted, and the limitations of traditional investment assessment methods, which do not account for network effects and the strategic advantages of distributed ledgers, were identified. Architectural requirements for building blockchain-based logistics systems were investigated, and the necessity of using consortium networks with hybrid data storage was substantiated.

The multidimensional synergistic assessment method was developed, based on the decomposition of the concept of efficiency into operational, economic, strategic, and sustainability vectors. An algorithm was created that combines the Analytic Hierarchy Process (AHP) for determining the weighting coefficients of criteria and the fuzzy logic apparatus for formalizing qualitative indicators of trust and reputation.

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	9
Вступ.....	11
1 Аналіз предметної області та постановка задачі дослідження.....	13
1.1 Огляд сучасних логістичних інформаційних систем та актуальність застосування технології блокчейн в них .....	13
1.2 Формалізація поняття ефективності для блокчейн-рішень у ланцюгах постачання.....	16
1.3 Огляд існуючих методів та підходів до оцінювання ефективності функціонування логістичних інформаційних систем .....	20
1.4 Постановка задачі дослідження.....	22
2 Розробка комплексного методу оцінювання ефективності блокчейн технології.....	25
2.1 Формування вимог до побудови логістичних інформаційних систем з використанням блокчейн технології .....	25
2.1.1 Архітектурно-технологічні вимоги та вибір типу реєстру .....	25
2.1.2 Функціональні вимоги до автоматизації процесів .....	27
2.1.3 Вимоги до безпеки, конфіденційності та джерел даних.....	28
2.2 Розробка комплексного методу оцінювання ефективності використання блокчейн технології в логістичних інформаційних системах .....	31
2.3 Розробка критеріїв для оцінювання ефективності використання блокчейн технології в логістичних інформаційних системах .....	35
2.3.1 Критерії операційно-технологічної ефективності.....	35
2.3.2 Критерії фінансово-економічної ефективності.....	36
2.3.3 Критерії стратегічної та ESG ефективності .....	37

3 Застосування комплексного методу оцінювання ефективності блокчейн технології для обґрунтування модернізації логістичної інформаційної системи .....	39
3.1 Методика та алгоритм використання комплексного методу оцінювання ефективності блокчейн технології в логістичних інформаційних системах .....	39
3.2 Порядок застосування критеріїв ефективності в рамках комплексного методу .....	49
3.2.1 Протокол оцінювання операційно-технологічних критеріїв.....	49
3.2.2 Протокол оцінювання фінансово-економічних критеріїв .....	51
3.2.3 Протокол оцінювання стратегічних та ESG критеріїв .....	52
4 Апробація результатів дослідження.....	54
4.1 Загальний опис логістичної інформаційної системи ХПП для проведення апробації.....	54
4.1.1 Характеристика об'єкта дослідження та системний аналіз логістичних процесів стану «As-Is» .....	54
4.1.2 Архітектура, топологія мережі та вибір технологічного стеку системи «AgriTrust-DLT».....	56
4.1.3 Бізнес-логіка та специфікація смарт-контрактів.....	58
4.1.4 Інтеграційний рівень та управління даними .....	59
4.2 Практичне застосування розробленого комплексного методу на прикладі логістичної інформаційної системи ХПП .....	60
4.2.1 Формування експертної групи та верифікація компетентності .....	60
4.2.2 Визначення вагових коефіцієнтів методом аналізу ієрархій.....	62
4.2.3 Симуляційне моделювання та оцінка кількісних показників .....	64
4.2.4 Нечітке моделювання якісних показників.....	66
4.3 Аналіз результатів та сценарії впровадження.....	67
4.3.1 Розрахунок інтегрального індексу та його інтерпретація.....	67
4.3.2 Багатоваріантний аналіз чутливості та сценарне моделювання .....	68
4.3.3 Рекомендації щодо впровадження.....	69

Висновки .....	70
Перелік джерел посилання .....	72
Додаток А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	76

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

БД – база даних;

ЛІС – логістична інформаційна система;

МБСО – метод багатовимірного синергетичного оцінювання;

ХПП – хлібоприймальне підприємство;

АНР – Analytic Hierarchy Process;

AML – Anti-Money Laundering;

API – Application Programming Interface;

BSC – Balanced Scorecard;

CAPEX – Capital Expenditure;

CBAM – Carbon Border Adjustment Mechanism;

CI – Consistency Index;

CR – Consistency Ratio;

DEA – Data Envelopment Analysis;

DLT – Distributed Ledger Technology;

EDI – Electronic Data Interchange;

ERP – Enterprise Resource Planning;

ESG – Environmental, Social, and Governance;

FTE – Full-Time Equivalent;

GPS – Global Positioning System;

IoT – Internet of Things;

IPFS – InterPlanetary File System;

KYC – Know Your Customer;

MRP – Material Requirements Planning;

NPS – Net Promoter Score;

NPV – Net Present Value;

OPEX – Operating Expenses;

OTIF – On-Time In-Full;

PBFT – Practical Byzantine Fault Tolerance;

PoA – Proof-of-Authority;

PoW – Proof-of-Work;

RI – Random Index;

ROI – Return on Investment;

SKU – Stock Keeping Unit;

STP – Straight-Through Processing;

TCO – Total Cost of Ownership;

TMS – Transportation Management System;

WMS – Warehouse Management System.

## ВСТУП

На сьогоднішній день глобальна економіка функціонує як складна мережа взаємопов'язаних ланцюгів постачання, ефективність яких є критичним фактором конкурентоспроможності. Центральним елементом управління цими процесами стали логістичні інформаційні системи, що забезпечують рух товарів від виробника до споживача. Однак традиційна архітектура таких систем, що базується на ізольованих базах даних, створює інформаційні бар'єри та знижує рівень довіри між учасниками ринку. Технологія блокчейн пропонує революційне вирішення цих проблем через створення єдиного розподіленого реєстру, що гарантує прозорість та незмінність даних. Натомість широке впровадження цієї технології стримується відсутністю адекватних інструментів для оцінки її реальної цінності. Традиційні фінансові методи фокусуються лише на грошових показниках і не здатні врахувати мережеві ефекти та стратегічні переваги, такі як підвищення довіри чи стійкість ланцюга поставок. Тому виникає нагальна потреба у створенні нових підходів, які б дозволили комплексно обґрунтувати доцільність інвестицій у блокчейн-рішення.

Об'єктом дослідження є процеси інформаційного управління та взаємодії в логістичних системах.

Предметом дослідження є методи, моделі та показники, що дозволяють оцінити ефективність цих процесів при використанні технології блокчейн.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю подолання розриву між потенціалом технології розподіленого реєстру та відсутністю практичних інструментів для вимірювання її впливу на бізнес-процеси. Розробка комплексного підходу, що поєднує фінансові, операційні та стратегічні аспекти, дозволить підприємствам переходити від фрагментованих систем до інтегрованих екосистем, обґрунтовано приймаючи рішення про цифрову трансформацію.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка комплексної методики

оцінювання ефективності застосування технології блокчейн в логістичних інформаційних системах, яка системно інтегрує кількісні та якісні показники.

Для досягнення мети буде сформовано вимоги до архітектури блокчейн-систем у логістиці, розроблено концептуальну структуру методу оцінювання, визначено систему критеріїв ефективності, створено алгоритм практичного застосування методики та проведено її апробацію на прикладі реального логістичного об'єкта для підтвердження валідності результатів.

# 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд сучасних логістичних інформаційних систем та актуальність застосування технології блокчейн в них

Сучасна глобальна економіка є складною мережею взаємопов'язаних ланцюгів постачання, які функціонують як кровоносна система світової торгівлі, забезпечуючи рух товарів, послуг та інформації від точок видобутку сировини до кінцевих споживачів. Ефективність, швидкість та надійність цих ланцюгів є критичними факторами конкурентоспроможності як окремих підприємств, так і цілих національних економік. Центральним елементом управління цими складними мережами є логістичні інформаційні системи (ЛІС) – інтегровані програмно-апаратні комплекси, що стали цифровим фундаментом сучасної логістики. Еволюція цих систем відображає загальний прогрес інформаційних технологій: від простих програм для планування потреби в матеріалах (MRP) у 1970-х роках до комплексних платформ, що керують усіма аспектами логістичної діяльності в рамках концепції Індустрії 4.0, яка передбачає повну цифровізацію та інтеграцію фізичних та віртуальних процесів [1].

Ключовими компонентами сучасного ІТ-ландшафту в логістиці є декілька типів систем, кожна з яких вирішує специфічне коло завдань. Системи управління складом (WMS) автоматизують та оптимізують усі внутрішньоскладські операції: від приймання товару та його ідентифікації до розміщення в оптимальних зонах зберігання та підготовки до відвантаження. Системи управління транспортом (TMS) фокусуються на оптимізації процесів перевезення, включаючи планування оптимальних маршрутів, консолідацію вантажів та відстеження їх руху. Ці спеціалізовані рішення, як правило, інтегруються в загальнокорпоративні системи планування ресурсів (ERP), які слугують єдиним центром для всіх бізнес-процесів компанії, пов'язуючи логістику з фінансами, закупівлями та продажами. Така інтеграція дозволяє

досягти високого рівня ефективності, але, як правило, лише в межах однієї організації.

Проблема виникає при взаємодії між різними компаніями. Незважаючи на значний прогрес в автоматизації, традиційна архітектура ЛІС, що базується на централізованих та ізольованих базах даних, стикається з фундаментальними обмеженнями. Кожен учасник ланцюга - виробник, постачальник, перевізник, митний брокер, ритейлер – веде власні записи у власній, часто несумісній з іншими системі. Ця технологічна та організаційна фрагментація даних створює так звані інформаційні «силоси», які перешкоджають наскрізній видимості [2]. Обмін інформацією між ними часто відбувається через застарілі протоколи, електронну пошту або паперові документи, що робить його повільним, ненадійним та вразливим до помилок. Ця заплутана та неефективна структура взаємодії, що породжує безліч проблем, наочно представлена на рисунку 1.1.

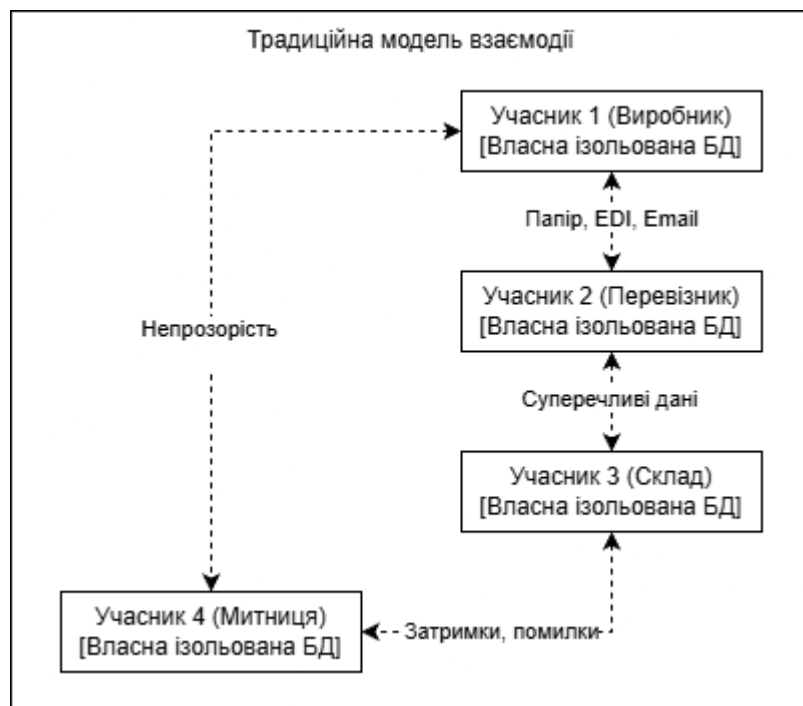


Рисунок 1.1 – Традиційна модель взаємодії

Як видно зі схеми, така архітектура є джерелом постійних операційних ризиків, фінансових втрат та недовіри між партнерами. Інформація передається послідовно та непрозоро, що призводить до виникнення «ефекту батоба», коли

незначні коливання попиту багаторазово посилюються вгору по ланцюгу поставок. У такому середовищі відсутнє єдине, узгоджене джерело правди, що змушує компанії нести значні транзакційні витрати на посередників та складні процедури верифікації.

Саме для вирішення цих системних проблем технологія блокчейн пропонує революційну парадигму [3]. Блокчейн, по суті, є розподіленим, криптографічно захищеним та незмінним цифровим реєстром, який спільно використовується та синхронізується між усіма довіреними учасниками мережі. Його ключові властивості – децентралізація, прозорість та цілісність даних – дозволяють створити єдиний та надійний інформаційний простір для всього ланцюга поставок. На противагу хаотичному стану традиційної моделі, блокчейн пропонує принципово нову, інтегровану модель взаємодії, що схематично показана на рисунку 1.2.

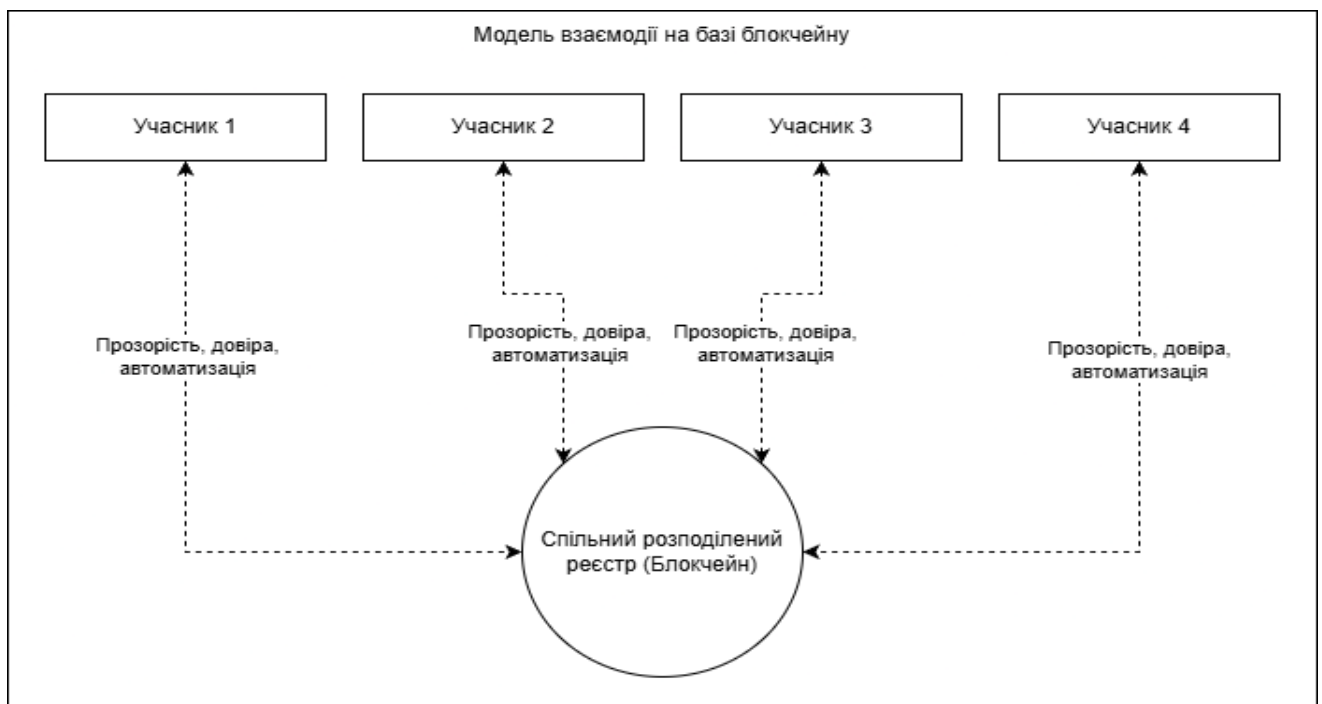


Рисунок 1.2 – Модель взаємодії на базі блокчейну

Ключова ідея полягає в тому, що замість десятків ізольованих баз даних з'являється єдиний, спільний та синхронізований реєстр, до якого всі учасники мають рівний доступ (відповідно до наданих прав). Кожна транзакція

(наприклад, передача права власності на товар, проходження митного контролю) після валідації записується в блок, який криптографічно пов'язується з попереднім, утворюючи нерозривний ланцюг. Після цього змінити або видалити запис заднім числом стає практично неможливо, що гарантує цілісність та достовірність усієї історії операцій. Ця властивість є критично важливою для підвищення прозорості ланцюга поставок, адже блокчейн розглядається як ключовий інструмент для досягнення повної видимості та відстежуваності [4, 16].

Актуальність технології значно посилюється можливістю автоматизації бізнес-логіки за допомогою смарт-контрактів [11]. Це комп'ютерні програми, що зберігаються в блокчейні та автоматично виконують заздалегідь узгоджені умови угоди [22]. Наприклад, смарт-контракт може автоматично здійснити платіж постачальнику одразу після того, як IoT-сенсор на контейнері підтвердить доставку вантажу в пункт призначення. Це не лише радикально прискорює бізнес-процеси, а й значно зменшує потребу в посередниках, знижуючи операційні витрати. Попри величезний потенціал, широке впровадження технології стикається з певними перешкодами. Дослідження виявили низку значних викликів, серед яких проблеми інтероперабельності, масштабованості, відсутність чітких правових рамок, а також високі початкові інвестиції та складність інтеграції з існуючими ЛІС [5]. Отже, перед підприємствами постає складне завдання – всебічно оцінити доцільність та потенційний ефект від переходу на блокчейн, що робить дослідження методів такої оцінки надзвичайно актуальним.

## 1.2 Формалізація поняття ефективності для блокчейн-рішень у ланцюгах постачання

Формалізація поняття ефективності для блокчейн-рішень у логістиці є

нетривіальним завданням, оскільки їхній вплив є багатограним і виходить далеко за межі традиційних фінансових показників. Цінність технології проявляється не стільки в локальній оптимізації процесів однієї компанії, скільки у трансформації всієї екосистеми ланцюга поставок через підвищення довіри та якості співпраці. Отже, ефективність тут слід розглядати як комплексну, багатовимірну категорію, що відображає сукупний позитивний вплив на операційні, економічні, стратегічні та соціально-екологічні аспекти діяльності [6]. Для адекватної оцінки необхідно декомпонувати це поняття на кілька ключових вимірів, кожен з яких характеризується власним набором показників [15].

Перший вимір – операційно-технологічна ефективність. Він відображає прямий вплив блокчейну на фізичні та інформаційні потоки в ланцюгу поставок. Покращення у цьому вимірі можна оцінити через скорочення загального часу циклу замовлення, підвищення точності та своєчасності доставок (інтегральний показник OTIF – On-Time-In-Full), а також суттєве зменшення кількості помилок, пов'язаних з ручною обробкою даних. Завдяки єдиному та незмінному джерелу правди, всі учасники отримують доступ до актуальної інформації в реальному часі, що дозволяє краще координувати свої дії, зменшувати час простою транспорту та підвищувати стійкість ланцюга поставок до збоїв (resilience).

Другий вимір – економічна ефективність. Цей аспект є більш традиційним і включає оцінку фінансових результатів. Впровадження блокчейну дозволяє досягти прямої економії за рахунок зниження адміністративних витрат, автоматизації документообігу та усунення дорогих послуг посередників. Смарт-контракти прискорюють фінансові розрахунки, що, в свою чергу, зменшує потребу в оборотному капіталі. Повна економічна оцінка повинна враховувати не лише прибутки, а й загальну вартість володіння (ТСО), що включає витрати на розробку, впровадження та підтримку системи.

Третій, і можливо найважливіший, вимір – стратегічна ефективність. Цей аспект найскладніший для кількісної оцінки, але саме в ньому криється основна трансформаційна цінність блокчейну. Технологія кардинально підвищує рівень

прозорості, дозволяючи відстежити весь шлях продукту від сировини до споживача. Це створює потужні конкурентні переваги, підвищуючи довіру споживачів до бренду. Ключовим ефектом є зміцнення довіри та співпраці між партнерами по ланцюгу поставок, що створює потужні мережеві ефекти [7].

Четвертий вимір – ефективність у сфері сталості (sustainability). Цей вимір охоплює екологічні, соціальні та управлінські аспекти (ESG). Блокчейн надає унікальні інструменти для забезпечення прозорості походження сировини (наприклад, для боротьби з незаконною вирубкою лісу), боротьби з контрафактом та підтвердження справедливих умов праці.

Для наочної систематизації вищезазначених аспектів, доцільно представити їх у вигляді узагальнюючої таблиці 1.1, що декомпозує поняття ефективності та пов'язує його з конкретними перевагами технології блокчейн.

Таблиця 1.1 – Декомпозиція поняття ефективності блокчейн-рішень у логістиці

Вимір ефективності	Ключові показники	Приклади метрик	Зв'язок з перевагою блокчейну
Операційно-технологічний	Швидкість та продуктивність	Скорочення часу циклу замовлення (дні); Скорочення часу митного оформлення (%)	Смарт-контракти, автоматизація процесів
	Якість та точність	Зменшення % помилок у документах; Зростання показника OTIF (%)	Єдине джерело правди, незмінність даних
	Стійкість та гнучкість	Зменшення часу на виявлення та вирішення проблем (год.); Підвищення завантаження транспорту (%)	Прозорість в реальному часі, децентралізація
Економічний	Зниження витрат	Зниження адміністративних витрат (грн); Економія на комісіях посередників (%)	Усунення посередників, автоматизація

Кінець таблиці 1.1

Вимір ефективності	Ключові показники	Приклади метрик	Зв'язок з перевагою блокчейну
Економічний	Оптимізація капіталу	Зменшення потреби в оборотному капіталі (грн); Скорочення страхових запасів	Прискорення розрахунків, точність даних
	Рентабельність	Показник рентабельності інвестицій (ROI); Загальна вартість володіння (ТСО)	Комплексний фінансовий результат
Стратегічний	Прозорість та відстежуваність	Час відстеження походження товару (хв.); % ланцюга поставок, що покривається системою	Розподілений реєстр, криптографічний зв'язок
	Довіра та співпраця	Зменшення кількості суперечок та штрафів (шт.); Індекс задоволеності партнерів	Незмінність даних, прозорість
	Конкурентні переваги	Підвищення лояльності клієнтів (NPS); Можливість встановлення преміум-ціни (%)	Підтвердження автентичності, репутація бренду
Сталий розвиток	Екологічна відповідальність	Можливість підтвердження відстежених перероблених матеріалів	Прозорість, відстежуваність
	Соціальна відповідальність	% постачальників з підтвердженим статусом Fair відсутності дитячої праці	Незмінність даних, прозорість

Таким чином, комплексна оцінка ефективності вимагає аналізу показників з усіх чотирьох вимірів, оскільки ігнорування будь-якого з них призведе до неповного та викривленого уявлення про реальну цінність технології. Такий структурований підхід дозволяє формалізувати поняття ефективності та створює основу для розробки практичної методики її оцінювання.

### 1.3 Огляд існуючих методів та підходів до оцінювання ефективності функціонування логістичних інформаційних систем

Оцінка ефективності інвестицій в інформаційні технології загалом, і в логістичні інформаційні системи зокрема, є класичною та водночас надзвичайно складною задачею управлінської науки. За десятиліття було розроблено безліч методів, які можна класифікувати на три основні групи: фінансові, якісні (нефінансові) та інтегровані. Розуміння цих методів, їхніх переваг та, що більш важливо, їхніх фундаментальних обмежень є необхідною передумовою для розробки підходу, адаптованого до унікальної, мережевої та багатогранної природи технології блокчейн.

Найбільш традиційною є група фінансових методів, оскільки вони надають кількісну оцінку в зрозумілих для бізнесу грошових одиницях. До них належать аналіз рентабельності інвестицій (ROI), розрахунок чистої приведеної вартості (NPV) та періоду окупності (Payback Period). Їхня привабливість полягає в об'єктивності та можливості порівняння проєктів. Однак їхній головний недолік при застосуванні до блокчейну полягає в тому, що вони не здатні адекватно врахувати нематеріальні активи, такі як довіра, прозорість, або зниження ризиків [8]. Крім того, вони погано працюють для систем з мережевими ефектами, де вигоди розподіляються між усіма учасниками, а не концентруються в одній компанії.

Друга група – якісні, або нефінансові, методи – намагається компенсувати обмеженість фінансових показників, фокусуючись на операційних та стратегічних аспектах. До них належить використання системи ключових показників ефективності (KPI) та бенчмаркінг. KPI дозволяють оцінити вплив системи на конкретні бізнес-процеси, проте стандартний набір KPI, розроблений для централізованих систем, не вловлює унікальні характеристики блокчейну і потребує створення нових метрик [6].

Третя група, інтегровані підходи, є найбільш перспективною, оскільки

намагається поєднати фінансові та нефінансові аспекти. Одним з найвідоміших методів є Система збалансованих показників (BSC), яка пропонує розглядати ефективність з кількох перспектив. Іншим потужним методом є аналіз обгортки даних (DEA), який дозволяє оцінити відносну ефективність групи об'єктів. Проте обидва ці підходи спроектовані для аналізу окремої організації і потребують значної адаптації для врахування ефектів у всій екосистемі партнерів [9].

Для систематизації та наочного порівняння розглянутих підходів, їхні сильні сторони та ключові обмеження у контексті блокчейну узагальнено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Критичний аналіз методів оцінки ефективності ЛІС та їх придатності для блокчейн-рішень

Категорія методів	Основне призначення та приклади	Переваги (в загальному контексті)	Ключові обмеження для оцінки блокчейну
Фінансові	Оцінка економічної доцільності інвестицій. (ROI, інвестицій)	Кількісна об'єктивність, зрозумілість для бізнесу, можливість порівняння проєктів	Ігнорують нематеріальні активи (довіра, прозорість, репутація). Не враховують мережеві ефекти та розподілені між учасниками вигоди
Якісні (нефінансові)	Вимірювання операційної та стратегічної ефективності. (KPI, Бенчмаркінг)	Фокус на якості процесів та рівні сервісу, порівняння з найкращими практиками	Стандартні KPI не відображають унікальних переваг блокчейну (незмінність, децентралізація). Бенчмаркінг ускладнений через новизну технології

Кінець таблиці 1.2

Категорія методів	Основне призначення та приклади	Переваги (в загальному контексті)	Ключові обмеження для оцінки блокчейну
Інтегровані	Комплексна оцінка з різних перспектив. (BSC - Система збалансованих показників, DEA - Аналіз обгортки даних)	Найбільш повний та збалансований підхід, що поєднує фінансові та нефінансові аспекти	Спроектовані для однієї організації, а не для екосистеми. Вимагають значної адаптації (напр., введення перспективи параметрів

Як демонструє таблиця, огляд існуючих підходів показує, що жоден з них не є універсальним рішенням для оцінки блокчейну. Фінансові методи є занадто вузькими, якісні - часто суб'єктивними та неповними, а інтегровані - потребують значної адаптації. Очевидною є необхідність у розробці комплексної, гібридної методики, яка б синтезувала елементи різних підходів і була б спеціально розроблена для врахування унікальних, багатогранних та мережевих ефектів технології розподіленого реєстру.

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

Проведений у попередніх підрозділах аналіз предметної області дозволяє сформулювати ключове науково-практичне протиріччя. З одного боку, як було продемонстровано в підрозділі 1.1, технологія блокчейн має величезний трансформаційний потенціал, дозволяючи перейти від фрагментованих та непрозорих інформаційних потоків до інтегрованої та надійної екосистеми. З іншого боку, як показав аналіз у підрозділі 1.3, існує явна прогалина у наявності практичних, науково обґрунтованих інструментів для оцінки реальної

ефективності від її впровадження.

Ця проблема поглиблюється тим, що сама ефективність, як було визначено в підрозділі 1.2, є багатовимірним поняттям, що охоплює не лише економічні, а й операційні, стратегічні та соціально-екологічні аспекти. Традиційні методи оцінки, розроблені для централізованих архітектур, не здатні охопити всю повноту цих ефектів. Неможливість комплексно оцінити нематеріальні активи, такі як підвищення довіри чи посилення стійкості ланцюга поставок, призводить до спотвореного уявлення про цінність технології. Це створює значний бар'єр для її широкого розповсюдження, оскільки компанії не можуть об'єктивно обґрунтувати значні інвестиції, що гальмує інноваційні процеси в одній з ключових галузей економіки.

З огляду на це, метою кваліфікаційної роботи є розробка комплексної методики оцінювання ефективності застосування технології блокчейн в логістичних інформаційних системах. Ця методика повинна системно інтегрувати кількісні та якісні показники, дозволяючи отримати об'єктивну, збалансовану та багатогранну оцінку впливу технології.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку послідовних завдань дослідження:

- проаналізувати та сформулювати ключові вимоги до архітектури та функціоналу логістичних інформаційних систем, що використовують технологію блокчейн, як основу для подальшої розробки методу оцінювання;
- розробити концептуальну структуру та принципи комплексного методу оцінювання ефективності, що інтегрує операційний, економічний, стратегічний та сталий виміри;
- визначити та обґрунтувати систему кількісних та якісних критеріїв для вимірювання показників ефективності в рамках розробленого методу;
- розробити детальний алгоритм та методику практичного застосування комплексного методу, що визначає послідовність кроків, необхідні дані та процедури розрахунку для обґрунтування модернізації ЛІС;
- провести апробацію розробленого методу та алгоритму на прикладі

логістичної інформаційної системи ХПП для підтвердження його практичної придатності та валідності;

– на основі результатів апробації проаналізувати отримані дані, сформулювати практичні рекомендації для підприємств та визначити перспективи подальших досліджень.

Об'єктом дослідження виступають процеси інформаційного управління та взаємодії в логістичних системах.

Предметом дослідження є методи, моделі та показники, що дозволяють оцінити ефективність цих процесів при використанні технології блокчейн.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у розробці нового науково-методичного підходу до оцінки ефективності блокчейн-технологій у логістиці. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика вперше системно інтегрує фінансові та операційні показники зі стратегічними перевагами технології в єдину модель, що дозволяє отримати комплексну та об'єктивну оцінку.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблена методика може бути використана логістичними та промисловими підприємствами як практичний інструмент для: обґрунтування інвестиційних рішень щодо впровадження блокчейну; порівняльного аналізу різних блокчейн-платформ; моніторингу та контролю ефективності вже реалізованих проєктів.

## **2 РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГІЇ**

2.1 Формування вимог до побудови логістичних інформаційних систем з використанням блокчейн технології

Розробка методу оцінювання ефективності будь-якої складної техніко-економічної системи неможлива без попереднього визначення чіткого переліку вимог до об'єкта оцінювання. У контексті ЛІС, що інтегрують технологію розподіленого реєстру DLT, етап формування вимог набуває критичного значення. Це зумовлено тим, що блокчейн не просто оптимізує існуючі процеси, а фундаментально змінює архітектуру обміну даними, трансформуючи її з централізованої моделі «зірка» у децентралізовану мережеву структуру [18, 20]. Як було зазначено у першому розділі роботи, традиційні ЛІС базуються на ізольованих базах даних, що створює інформаційні «силоси» та бар'єри довіри. Отже, вимоги до нової системи повинні виходити з необхідності подолання цих архітектурних обмежень.

Формування вимог до побудови ЛІС на базі блокчейну доцільно проводити за системним підходом, класифікуючи їх за чотирма основними категоріями: архітектурно-технологічні, функціональні, вимоги до безпеки та даних, а також вимоги до інтероперабельності та стандартів.

### **2.1.1 Архітектурно-технологічні вимоги та вибір типу реєстру**

Фундаментальною вимогою, що визначає подальшу ефективність системи, є вибір типу блокчейн-мережі. У логістичній сфері, де конфіденційність комерційних даних (ціни, обсяги поставок, клієнтська база) є пріоритетом, використання публічних блокчейнів, таких як Bitcoin або Ethereum Mainnet, є

неприйнятним. Це зумовлено повною прозорістю транзакцій для всіх зовнішніх спостерігачів, низькою пропускнуою здатністю та високою волатильністю вартості транзакцій.

Таким чином, першою критичною вимогою є забезпечення контрольованого доступу. Система повинна базуватися на архітектурі консорціумного блокчейну (наприклад, на базі Hyperledger Fabric, R3 Corda або Quorum) [12]. У такій мережі ідентифікація учасників (KYC – Know Your Customer) проводиться до надання їм прав на читання та запис у реєстр, що дозволяє зберегти баланс між децентралізацією та корпоративною безпекою.

Архітектура системи повинна відповідати наступним специфічним вимогам:

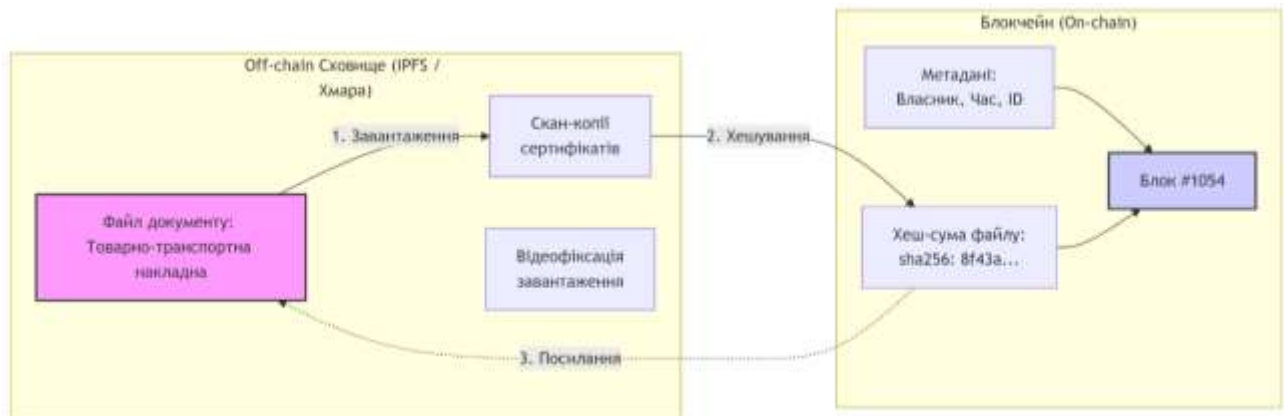
- гібридність зберігання даних (On-chain vs Off-chain). Блокчейн за своєю природою не є ефективним сховищем для великих обсягів даних, таких як скани товаросупровідних документів, відео з камер спостереження або CAD-моделі деталей. Запис таких даних у блоки призведе до «роздування» реєстру та падіння продуктивності. Тому архітектура повинна передбачати збереження у блокчейні лише хеш-сум документів та критичних метаданих, тоді як самі файли мають зберігатися у розподілених файлових системах (наприклад, IPFS) або захищених хмарних сховищах («Off-chain storage»). Це забезпечує незмінність доказів при збереженні високої швидкодії;

- модульність та мікросервісна архітектура. Інтеграція блокчейну не повинна вимагати повної заміни існуючих ERP, WMS та TMS систем підприємств, оскільки це економічно недоцільно. Вимагається наявність розвинених API-шлюзів та адаптерів (RESTful API, gRPC), які дозволяють застарілим системам взаємодіяти з вузлами блокчейну. Це дозволяє реалізувати концепцію "блокчейн як сполучна тканина", що об'єднує різноманітні системи учасників ланцюга постачання;

- енергоефективний механізм консенсусу. Вимога до сталого розвитку та швидкості транзакцій виключає використання енергоємних алгоритмів Proof-of-Work (PoW). Система повинна базуватися на алгоритмах, що забезпечують

високу пропускну здатність та миттєву фіналізацію транзакцій. Найбільш доцільними є алгоритми класу PBFT, Raft або Proof-of-Authority (PoA) [19]. Це дозволяє обробляти тисячі транзакцій на секунду, що є критичним для глобальних логістичних потоків.

На рисунку 2.1 зображено схему гібридної архітектури зберігання даних (On-chain vs Off-chain).



Рисунк 2.1 – Схема гібридної архітектури зберігання даних

### 2.1.2 Функціональні вимоги до автоматизації процесів

Функціональні вимоги визначають здатність системи вирішувати конкретні бізнес-проблеми, такі як "ефект батога" та непрозорість, виявлені у першому розділі.

Система повинна гарантувати, що будь-який запис про переміщення товару, зміну температурного режиму або передачу права власності не може бути змінений або видалений заднім числом. Кожна транзакція повинна містити криптографічний підпис ініціатора та часову мітку, що формує єдиний, юридично значущий аудиторський слід для всього життєвого циклу товару.

Однією з ключових вимог є підтримка смарт-контрактів, повних за Тюрінгом. Це дозволяє перейти від пасивного реєстру до активної системи

виконання угод. Основні сценарії, які мають бути реалізовані:

- автоматичний фінансовий розрахунок: ініціювання платежу постачальнику автоматично в момент підтвердження доставки (Proof of Delivery), що підписується цифровим ключем отримувача або IoT-сенсором;
- параметричний контроль умов перевезення: якщо IoT-сенсор фіксує порушення температурного режиму, смарт-контракт автоматично фіксує інцидент, розраховує штрафні санкції та блокує оплату за некондиційний товар, усуваючи необхідність у тривалих судових розглядах;
- цифрова ідентифікація активів: створення цифрових двійників для фізичних активів, що дозволяє відстежувати їхній стан у реальному часі.

### 2.1.3 Вимоги до безпеки, конфіденційності та джерел даних

У логістичному консорціумі конкуренти (наприклад, два експедитори) часто співпрацюють в рамках однієї мережі. Тому вимога конфіденційності даних є визначальною. Система повинна підтримувати механізми розділення каналів даних або використовувати криптографічні методи, такі як докази з нульовим розголошенням. Це дозволяє валідувати транзакцію всією мережею без розкриття її комерційного змісту (ціни, номенклатури) третім сторонам.

Окремою критичною вимогою є вирішення "проблеми оракула". Оскільки блокчейн гарантує незмінність даних, але не їхню істинність на вході, система вимагає обов'язкової інтеграції з довіреними IoT-пристроями. Вимога полягає у тому, щоб дані про фізичний стан вантажу (температура, вологість, GPS-координати, удари) підписувалися приватним ключем безпосередньо на апаратному рівні сенсора [14]. Це мінімізує вплив людського фактора та ризик введення недостовірних даних («Garbage In, Garbage Out»).

На рисунку 2.2 зображено схему взаємодії «IoT – Оракул – Смарт-контракт».

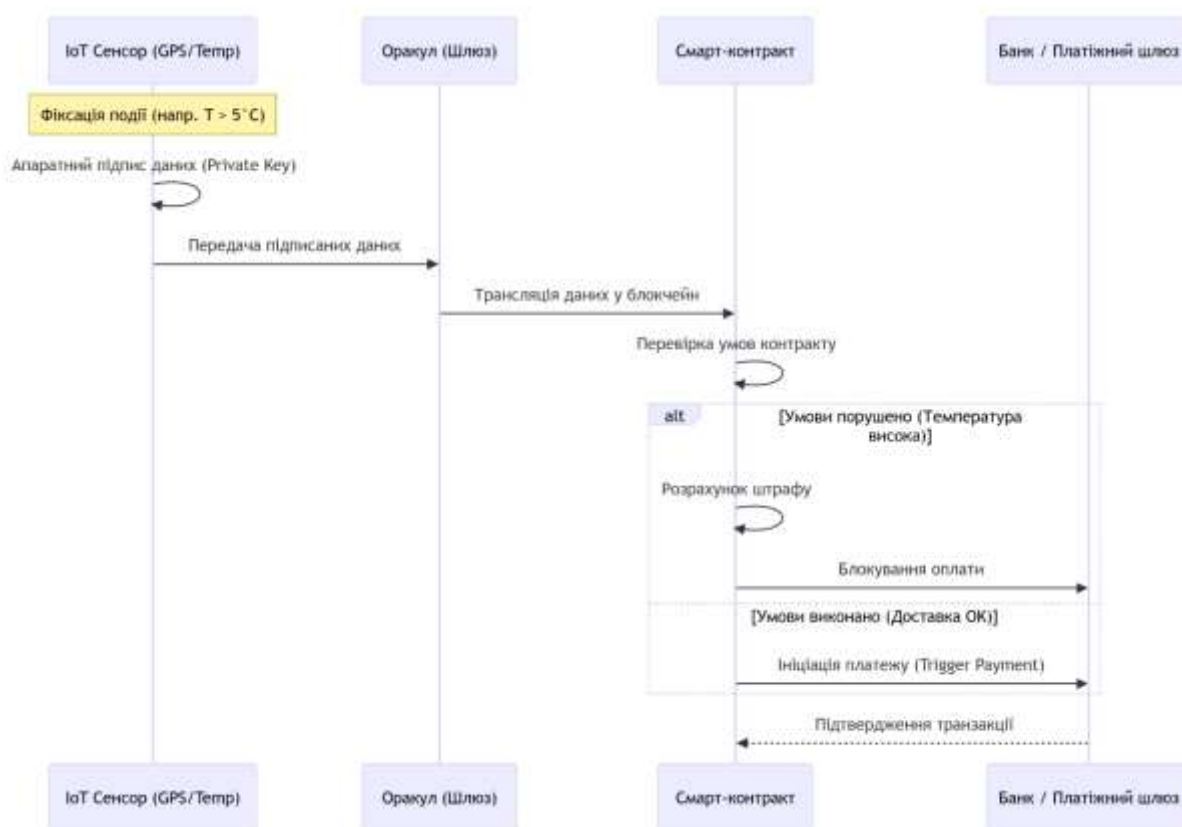


Рисунок 2.2 – Схема взаємодії «IoT – Оракул – Smart-контракт»

Узагальнення сформованих вимог, що стануть базисом для розробки критеріїв оцінювання, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Матриця вимог до побудови логістичних інформаційних систем на базі блокчейн технології

Категорія вимог	Вимога	Технічна реалізація та обґрунтування	Вплив на ефективність ЛІС
Архітектурні	Тип доступу	Permissioned (Консорціум). Ідентифікація вузлів через X.509 сертифікати.	Забезпечує безпеку та відповідність вимогам регуляторів (KYC/AML).

## Кінець таблиці 2.1

Категорія вимог	Вимога	Технічна реалізація та обґрунтування	Вплив на ефективність ЛІС
Архітектурні	Механізм консенсусу	Детермінований (PBFT, Raft). Відсутність майнінгу.	Висока пропускна здатність, низька латентність, енергоефективність.
	Зберігання даних	Гібридне (On-chain/Off-chain). IPFS або приватні сховища для «важких» даних.	Оптимізація вартості зберігання, швидкодія системи.
Функціональні	Бізнес-логіка	Смарт-контракти. Повна автоматизація виконання умов угод.	Зниження операційних витрат, усунення посередників, прискорення розрахунків.
	Простежуваність	Незмінний журнал подій з криптографічним доказом.	Прозорість, боротьба з контрафактом, швидке реагування на інциденти.
Безпека та дані	Конфіденційність	Channels / ZKP. Розмежування видимості даних для учасників.	Захист комерційної таємниці при збереженні спільної довіри.
	Валідація даних	Trusted IoT Oracles. Апаратний підпис даних сенсорами.	Гарантія достовірності вхідних даних, мінімізація шахрайства.
Інтеграційні	Сумісність	API Gateway / Standards. Інтеграція з ERP (SAP, Oracle) та стандартами	Збереження інвестицій у існуючі ІТ-системи, безшовний обмін даними.

Підсумовуючи, формування вимог до ЛІС на базі блокчейну вимагає переходу від фокусу на «функціоналі окремого додатку» до фокусу на «архітектурі екосистеми». Тільки дотримання комплексу архітектурних, функціональних та безпекових вимог дозволяє реалізувати потенціал технології, описаний у першому розділі, та створити підґрунтя для розробки адекватного

методу оцінювання її ефективності.

## 2.2 Розробка комплексного методу оцінювання ефективності використання блокчейн технології в логістичних інформаційних системах

Як показав аналіз існуючих підходів у підрозділі 1.3, застосування виключно традиційних фінансових методів (ROI, NPV) або окремих якісних метрик не дозволяє коректно оцінити ефективність впровадження блокчейн-технологій. Основна проблема полягає в тому, що блокчейн створює переважно мережеві ефекти, вигода від яких розподіляється між багатьма учасниками, а також генерує значні нематеріальні активи (довіра, стійкість), які ігноруються класичними бухгалтерськими підходами.

Для вирішення цієї проблеми пропонується розробити метод багатовимірного синергетичного оцінювання (МБСО) ефективності блокчейн-технологій у логістиці. Сутність методу полягає у декомпозиції поняття ефективності на чотири взаємопов'язані вектори (операційний, економічний, стратегічний, сталий) з подальшим їх синтезом у інтегральний показник, що дозволяє отримати збалансовану оцінку «As-Is» (поточний стан) проти «To-Be» (прогнозований стан).

Метод базується на гіпотезі, що інтегральна ефективність впровадження блокчейну ( $E_{int}$ ) є функцією від сукупності локальних ефективностей за різними вимірами, зважених відповідно до стратегічних пріоритетів підприємства або консорціуму. Математично модель можна представити у вигляді адитивної згортки нормованих показників:

$$E_{int} = \sum_{i=1}^n w_i * E_i(P), \quad (2.1)$$

де  $E_{int}$  – інтегрований індекс ефективності блокчейн-рішення;

$i$  – індекс виміру ефективності;

$E_i(P)$  – функція оцінки ефективності за  $i$ -м виміром, що залежить від множини параметрів  $P$ ;

$w_i$  – ваговий коефіцієнт значущості  $i$ -го виміру, що визначається експертним методом, причому  $\sum w_i = 1$ .

Розроблений метод реалізується через алгоритм, що складається з п'яти послідовних етапів.

Етап 1: попередній скринінг доцільності.

Блокчейн є складною та вартісною технологією, яка не є універсальним рішенням для всіх логістичних задач. Тому першим етапом методу є перевірка доцільності застосування технології за допомогою моделі «дерева рішень». Якщо на цьому етапі виявляється, що задачу можна вирішити традиційною базою даних, подальша оцінка припиняється.

Ключові умови фільтрації (необхідні та достатні умови):

- потреба у спільному запису: чи є потреба у тому, щоб кілька незалежних сторін мали право записувати дані у спільний реєстр?
- відсутність довіреного посередника: чи існує недовіра між учасниками або чи є вартість послуг посередника надмірно високою?
- вимога до незмінності: чи є критичною вимога до аудиту історії транзакцій, яку неможливо фальсифікувати?

Тільки при позитивній відповіді на всі питання переходимо до етапу 2.

Етап 2: оцінювання операційної ефективності ( $E_{op}$ ) через часові параметри.

Операційна ефективність вимірюється через прискорення бізнес-процесів. Традиційні методи оцінюють лише час транспортування, але метод МБСО фокусується на інформаційних затримках. Вводиться показник коефіцієнта прискорення інформаційного обміну ( $K_{acc}$ ):

$$K_{acc} = \frac{T_{trad}}{T_{bc} + T_{fin}}, \quad (2.2)$$

де  $T_{trad}$  – сумарний час виконання операції в традиційній системі (включаючи час на створення документів, пересилку, ручну перевірку, очікування підтвердження);

$T_{bc}$  – час виконання операції в блокчейн-системі (автоматична валідація смарт-контрактом);

$T_{fin}$  – час технічної фіналізації транзакції в блокчейні (час досягнення консенсусу).

Якщо  $K_{acc} > 1$ , це свідчить про операційну доцільність. Особлива увага приділяється зменшенню часу на звірку даних (reconciliation), який у традиційних системах може займати дні, а в блокчейні – секунди.

Етап 3: оцінювання економічної ефективності ( $E_{ec}$ ) з урахуванням екосистеми.

Для економічної оцінки метод модифікує класичний підхід TCO (Total Cost of Ownership), розширюючи його до рівня екосистеми. Замість локального прибутку однієї фірми розраховується синергетичний економічний ефект ( $SE_{eco}$ ):

$$SE_{eco} = \sum_{j=1}^m (\Delta C_{admin_j} + \Delta C_{intermed_j} + \Delta R_{new_j}) - \sum_{j=1}^m (I_{capex_j} + I_{opex_j}), \quad (2.3)$$

де  $m$  – кількість учасників ланцюга (виробники, перевізники, ритейлери);

$\Delta C_{admin_j}$  – зниження адміністративних витрат  $j$ -го учасника (менше персоналу на обробку паперів);

$\Delta C_{intermed_j}$  – економія на комісіях посередникам (брокерам, банкам);

$\Delta R_{new_j}$  – додатковий дохід від нових бізнес-моделей (наприклад, премія за прозорість);

$I_{capex_j}$  – капітальні інвестиції на впровадження вузлів;

$I_{opex_j}$  – операційні витрати на підтримку мережі (smart contract audit, cloud hosting).

Цей підхід дозволяє ідентифікувати диспропорції, коли один учасник несе

витрати, а вигоду отримує інший, що є основою для розробки механізмів компенсації (tokenomics).

Етап 4: оцінювання стратегічної та сталої ефективності ( $E_{st}, E_{sus}$ ) методами нечіткої логіки.

Стратегічні переваги (підвищення довіри, репутація бренду) та показники сталого розвитку важко оцінити у грошовому еквіваленті. Для їх формалізації метод пропонує використовувати апарат теорії нечітких множин.

Спочатку визначаються лінгвістичні змінні, наприклад, «рівень довіри в мережі» з терм-множиною {дуже низький, низький, середній, високий, абсолютний}.

Далі експертна група оцінює зміну стану за цими змінними і врешті, за допомогою функцій приналежності, лінгвістичні оцінки фазифікуються, агрегуються та дефазифікуються у чітке числове значення індексу.

Це дозволяє математично врахувати «м'які» фактори, які часто є вирішальними для впровадження блокчейну (наприклад, відповідність вимогам екологічного регулювання).

Етап 5: синтез та аналіз чутливості.

На фінальному етапі отримані нормовані значення згортаються у інтегральний індекс  $E_{int}$ . Критично важливим елементом методу є проведення сценарного аналізу чутливості. Враховуючи новизну технології, необхідно розрахувати ефективність для трьох сценаріїв:

- оптимістичний: масове прийняття партнерами, безвідмовна робота смарт-контрактів;
- базовий: поступова інтеграція, наявність гібридних процесів;
- песимістичний: технічні збої, регуляторні обмеження, низька активність партнерів.

Стійкість показника  $E_{int}$  до зміни вхідних параметрів є індикатором ризику проекту.

Запропонований метод МБСО відрізняється від аналогів своєю комплексністю. Він інтегрує кількісний аналіз прискорення процесів та

зниження витрат з якісним аналізом стратегічних переваг, використовуючи математичний апарат для зведення цих різномірних даних до єдиного знаменника. Це надає керівництву підприємств науково обґрунтований інструмент для прийняття рішень щодо цифрової трансформації логістики.

## 2.3 Розробка критеріїв для оцінювання ефективності використання блокчейн технології в логістичних інформаційних системах

Для практичної реалізації розробленого методу МБСО необхідно сформулювати систему конкретних, вимірюваних критеріїв (метрик/КРІ), які наповнюють змістом вектори ефективності. Базуючись на аналізі вимог та структурі методу, необхідно розробити деталізовану систему критеріїв, згруповану за чотирма проєкціями, що корелюють з модифікованою системою збалансованих показників.

### 2.3.1 Критерії операційно-технологічної ефективності

Критерії операційно-технологічної ефективності характеризують «внутрішнє здоров'я» логістичних процесів та технічну продуктивність блокчейн-рішення. Їх наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Критерії операційно-технологічної ефективності

Група	Критерій (Метрика)	Опис та формула розрахунку	Цільовий тренд
Швидкість	Час циклу документообігу	Час від створення до фінального підписання документу всіма сторонами. $\Delta T = T_{paper} - T_{smart\_contract}$	Мінімізація (↓)
	Час звірки даних	Час, що витрачається бухгалтерією та менеджерами на усунення розбіжностей у записах контрагентів. У блокчейні прагне до 0.	Мінімізація (↓)
	Швидкість митного оформлення	Середній час проходження митних процедур завдяки попередній валідації незмінних даних у реєстрі.	Мінімізація (↓)
Технічні	Рівень цілісності даних	Відсоток транзакцій, що не потребують ручного втручання або коригування (Straight-Through Processing).	Максимізація (↑)
	Точність та своєчасність (ОТІФ покращений)	Інтегральний показник On-Time-In-Full, скоригований на достовірність даних про доставку з IoT-сенсорів.	Максимізація (↑)
Технічні	Час фіналізації транзакції (затримка)	Час від відправки транзакції до моменту її незворотного запису в блок. Критично для процесів реального часу.	Мінімізація (↓)
	Доступність системи	Час безперебійної роботи мережі розподілених вузлів (на відміну від централізованого сервера, де є єдина точка відмови).	Максимізація (↑)

Найбільш показовим критерієм є Час звірки даних. Традиційно це пост-фактум процес, який заморожує ресурси. Блокчейн переносить звірку на момент транзакції (через механізм консенсусу), що вивільняє значні адміністративні ресурси.

### 2.3.2 Критерії фінансово-економічної ефективності

Критерії фінансово-економічної ефективності трансформують технічні переваги у грошовий вимір. Їх наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Критерії фінансово-економічної ефективності

Група	Критерій	Економічний зміст та джерела даних
Витрати	Зниження адміністративних витрат	Економія на папері, друці, поштових послугах, архівації та зарплаті персоналу, зайнятого ручною обробкою даних.
	Усунення витрат на посередників	Сума комісійних, що раніше сплачувалися експедиторам, брокерам, факторинговим компаніям, функції яких перебрав на себе смарт-контракт.
	Вартість вирішення суперечок	Зниження витрат на юридичний супровід та арбітраж завдяки наявності незаперечного цифрового сліду.
Капітал	Вивільнення оборотного капіталу	Зменшення циклу «Cash-to-Cash». Смарт-контракти дозволяють миттєву оплату по факту доставки (Trigger Payment), усуваючи касові розриви.
	Зменшення страхових запасів	% зниження рівня запасів на складах завдяки підвищенню точності прогнозування попиту (усунення ефекту батога).
Інвестиції	ROI	Співвідношення чистого екосистемного ефекту до сукупних витрат на впровадження (TCO).

### 2.3.3 Критерії стратегічної та ESG ефективності

Критерії стратегічної та ESG ефективності оцінюють довгостроковий вплив на позицію компанії на ринку та її відповідність принципам сталого розвитку. Їх наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Критерії стратегічної та ESG ефективності

Група	Критерій	Методика вимірювання
Стратегія	Індекс довіри партнерів	Результати опитування контрагентів щодо рівня довіри до даних у спільній мережі (шкала 1-10 або нечітка логіка).
	Захист від контрафакту	% зменшення випадків виявлення підробленої продукції або несанкціонованих замін у ланцюгу постачання.
	Стійкість ланцюга	Час реакції та відновлення ланцюга постачання після кризової події (збій поставки, форс-мажор) завдяки повній прозорості.

## Кінець таблиці 2.4

ESG	Прозорість походження	% SKU (товарних позицій), для яких доступна повна історія від сировини до полиці.
	Точність вуглецевого сліду	Можливість надання верифікованих даних про викиди CO2 (Score 3) для кожної партії товару (важливо для compliance).
ESG	Етичність ланцюга постачання	Наявність незмінного підтвердження дотримання соціальних стандартів (Fair Trade, відсутність дитячої праці) на кожному етапі.

Для інтеграції цих різнорідних критеріїв у єдину модель методу МБСО необхідно застосовувати процедуру нормалізації. Критерії, що мають різні одиниці виміру (дні, гривні, відсотки, бали), приводяться до безрозмірної шкали. Для позитивних критеріїв (ROI, довіра):  $x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$ . Для негативних критеріїв (витрати, час):  $x_{norm} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}}$ .

Розроблена система критеріїв є вичерпною та охоплює всі рівні функціонування ЛІС. Вона дозволяє не лише констатувати факт впровадження технології, але й кількісно виміряти її реальний вплив на ефективність бізнесу, що є необхідною умовою для переходу від хайпу навколо блокчейну до його прагматичного використання в реальній економіці.

### **3 ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДУ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОКЧЕЙН ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**

3.1 Методика та алгоритм використання комплексного методу оцінювання ефективності блокчейн технології в логістичних інформаційних системах

Практичне застосування комплексного методу оцінювання ефективності модернізації ЛІС на базі блокчейну є ітераційним процесом, що поєднує в собі елементи системного аналізу, експертного оцінювання та математичного моделювання. Враховуючи гібридну природу ефектів від впровадження блокчейну (поєднання чітких фінансових показників з нечіткими стратегічними перевагами, такими як довіра та прозорість), методика реалізації методу базується на послідовному виконанні семи ключових етапів. Кожен етап має чітко визначені вхідні дані, інструменти обробки та вихідні результати, що забезпечує верифікованість та відтворюваність оцінки.

Загальний алгоритм використання комплексного методу можна декомпонувати на підготовчу, розрахункову та аналітичну фази, які деталізовано нижче.

Етап 1. Формування експертної групи та оцінка її компетентності.

Специфіка блокчейн-проектів у логістиці полягає у тому, що значна частина критичних факторів успіху (довіра між контрагентами, репутаційні ризики, стійкість до кіберзагроз) має якісний характер і важко піддається прямому інструментальному вимірюванню. У зв'язку з цим, методика спирається на використання експертних знань для оцінки стратегічних та сталих параметрів, а також для визначення ваг критеріїв. Якість вихідного результату моделювання знаходиться у прямій залежності від рівня кваліфікації залучених експертів.

Процедура формування експертної групи передбачає відбір фахівців за трьома ключовими доменами знань:

– ІТ-архітектура та блокчейн: розуміння технічних аспектів DLT, смарт-

контрактів, криптографії та інтеграції систем;

– управління ланцюгами постачання: глибоке знання логістичних бізнес-процесів, «вузьких місць» у документообігу та взаємодії з митницею/регуляторами;

– фінанси та стратегічне планування: здатність оцінити економічну ефективність інвестицій та ризики.

Для мінімізації суб'єктивізму та забезпечення наукової обґрунтованості відбору, застосовується формалізована методика розрахунку коефіцієнта компетентності ( $K_{comp}$ ) для кожного кандидата. Інтегральний коефіцієнт компетентності розраховується як середнє значення між коефіцієнтом інформованості (знань) та коефіцієнтом аргументації:

$$K_{comp_i} = \frac{K_{z_i} + K_{a_i}}{2}, \quad (3.1)$$

де  $K_{z_i}$  – коефіцієнт інформованості  $i$ -го експерта щодо проблеми, що вирішується. Визначається на основі самооцінки експерта за 10-бальною шкалою, де 0 – повна відсутність знань, 10 – вичерпні знання. Отриманий бал ділиться на 10 для нормалізації;

$K_{a_i}$  – коефіцієнт аргументації, що характеризує структуру джерел, на яких базується думка експерта.

Значення коефіцієнта аргументації ( $K_a$ ) формується шляхом підсумовування балів, присвоєних різним джерелам аргументації відповідно до таблиці стандартних значень. Наприклад:

– наявність практичного досвіду впровадження або експлуатації ЛІС: 0.5 бала;

– вивчення теоретичних джерел та наукових публікацій: 0.3 бала;

– узагальнення досвіду вітчизняних та закордонних підприємств: 0.2 бала;

– інтуїція та загальні уявлення: 0.05 бала.

Гранична сума балів за всіма джерелами дорівнює 1.0.

До складу робочої групи включаються лише ті кандидати, для яких розрахований коефіцієнт компетентності задовольняє умову  $K_{comp} \geq 0.67$  (що відповідає середньому та високому рівню компетентності). У подальших розрахунках (зокрема при агрегації нечітких оцінок) думка кожного експерта враховується не рівнозначно, а з вагою, пропорційною його компетентності. Нормований ваговий коефіцієнт  $i$ -го експерта ( $w_{exp_i}$ ) розраховується за формулою:

$$w_{exp_i} = \frac{K_{comp_i}}{\sum_{j=1}^n K_{comp_j}}, \quad (3.2)$$

де  $n$  – загальна кількість експертів у сформованій групі.

Такий підхід дозволяє «відфільтрувати» шум та підвищити достовірність групової оцінки, надаючи більшого значення думкам найбільш кваліфікованих фахівців.

Етап 2. Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв методом аналізу ієрархій (АНР).

Розроблений комплексний метод оцінювання базується на чотирьох векторах ефективності (операційний, економічний, стратегічний, сталий), кожен з яких містить набір специфічних критеріїв. Очевидно, що для різних типів логістичних операторів важливість цих критеріїв буде різною. Наприклад, для ЗРЛ-оператора, що спеціалізується на експрес-доставці, критичним є час обробки (операційний вектор), тоді як для постачальника фармацевтичної продукції пріоритетом є захист від фальсифікації (стратегічний вектор) та температурний контроль.

Для математично коректного визначення пріоритетів застосовується Метод Аналізу Ієрархій (Analytic Hierarchy Process) [10]. Цей метод дозволяє декомпонувати проблему вибору на ієрархічні рівні та отримати вектор глобальних ваг критеріїв через процедуру парних порівнянь.

Крок 1. Побудова матриць парних порівнянь.

На цьому кроці експерти заповнюють матриці порівнянь для кожного рівня ієрархії: спочатку порівнюються групи критеріїв (вектори), а потім – локальні критерії всередині кожної групи. Використовується фундаментальна шкала Сааті від 1 до 9, яку наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Фундаментальна шкала Сааті [10]

Бал	Визначення	Пояснення
1	Рівна важливість	Критерії вносять однаковий вклад у досягнення мети.
3	Помірна перевага	Досвід та судження дають легку перевагу одному критерію над іншим.
5	Суттєва перевага	Один критерій значно важливіший за інший.
7	Значна перевага	Перевага одного критерію над іншим є дуже сильною.
9	Абсолютна перевага	Свідчення на користь одного критерію є незаперечними.
2, 4, 6, 8	Проміжні значення	Використовуються для компромісних оцінок.

Результатом роботи кожного експерта є набір зворотно-симетричних матриць  $A$  розмірністю  $n \times n$ , де елемент  $a_{ij}$  відображає перевагу критерію  $i$  над критерієм  $j$ , причому  $a_{ji} = 1/a_{ij}$  та  $a_{ii} = 1$ .

Крок 2. Обчислення власного вектора та ваг.

Математична сутність методу АНР полягає у знаходженні головного власного вектора матриці суджень, який після нормалізації стає вектором пріоритетів (ваг)  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ .

Для практичних розрахунків в рамках кваліфікаційної роботи доцільно використовувати метод середнього геометричного, який дає достатньо точне наближення до власного вектора. Алгоритм розрахунку для кожного рядка  $i$ :

– обчислюється середнє геометричне елементів рядка:

$$V_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}; \quad (3.3)$$

– проводиться нормалізація отриманих значень для отримання ваги  $w_i$ :

$$w_i = \frac{V_i}{\sum_{k=1}^n V_k}. \quad (3.4)$$

Умова  $\sum w_i = 1$  є обов'язковою.

Крок 3. Перевірка узгодженості експертних суджень.

Однією з головних переваг методу АНР є вбудований механізм контролю якості експертних оцінок. Оскільки людські судження можуть бути транзитивно суперечливими (наприклад, експерт стверджує, що А важливіше за В, В важливіше за С, але С важливіше за А), необхідно розрахувати Відношення Узгодженості (Consistency Ratio).

Алгоритм перевірки узгодженості:

– розрахунок власного числа  $\lambda_{max}$ . Спочатку множиться матриця порівнянь А на отриманий вектор ваг W, отримуючи вектор зважених сум. Потім кожен елемент цього вектора ділиться на відповідну вагу  $w_i$ . Середнє арифметичне отриманих значень дає наближення  $\lambda_{max}$ :

$$\lambda_{max} \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{w_i}, \quad (3.5)$$

– розрахунок Індексу Узгодженості (Consistency Index):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}. \quad (3.6)$$

Для ідеально узгодженої матриці  $\lambda_{max} = n$ , тому  $CI = 0$ ;

– розрахунок Відношення Узгодженості (CR):

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (3.7)$$

де RI – таблична величина, що показує середній індекс узгодженості для випадково згенерованих матриць розмірності n.

Значення RI наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Значення RI

Розмірність матриці (n)	3	4	5	6	7	8	9	10
Випадковий Індекс (RI)	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Якщо  $CR \leq 0.10$  (10%), матриця суджень вважається достатньо узгодженою, а отримані ваги – коректними. Якщо  $CR > 0.10$ , це свідчить про наявність логічних суперечностей в думках експерта. У такому випадку експерту повертається матриця для перегляду та уточнення оцінок. Цей ітераційний процес триває до досягнення прийнятного рівня узгодженості.

Етап 3. Збір та нормалізація кількісних даних (Операційний та Економічний вектори).

Далі відбувається наповнення моделі емпіричними даними щодо операційних та економічних параметрів функціонування ЛС. Методика передбачає порівняльний аналіз двох станів системи: поточний стан з традиційною ЛС та прогнозований стан після впровадження блокчейну.

Для поточного стану використовуються методи хронометражу технологічних операцій, аналіз логів існуючих транзакційних систем (ERP, WMS, TMS) та дані управлінського обліку.

Для прогнозованого стану використовуються результати імітаційного моделювання, дані пілотних проєктів, бенчмаркінгові звіти галузевих лідерів (наприклад, IBM Food Trust, Maersk TradeLens) або технічні специфікації обраної платформи (наприклад, пропускна здатність Hyperledger Fabric у TPS).

Оскільки вимірювані показники мають різні одиниці виміру (час у годинах, вартість у гривнях, відсоток помилок), їх пряме додавання неможливе. Необхідно привести всі значення до безрозмірної шкали в діапазоні від 1 до 10. Використовується метод лінійної нормалізації.

Для показників-стимуляторів, збільшення яких є бажаним (наприклад, ROI, пропускна здатність, рівень STP):

$$x_{norm} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}. \quad (3.8)$$

Для показників-дестимуляторів, зменшення яких є метою модернізації (наприклад, час циклу, вартість транзакції, кількість помилок):

$$x_{norm} = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3.9)$$

де  $x_{min}$  та  $x_{max}$  – референтні значення, що визначаються як найгірші та найкращі показники в галузі або граничні значення, встановлені стратегією підприємства.

Етап 4. Нечітке моделювання якісних показників (стратегічний та сталий вектори).

Критерії стратегічної ефективності (рівень довіри, репутація бренду) та сталого розвитку (соціальна відповідальність, прозорість походження) характеризуються високим рівнем невизначеності та суб'єктивізму. Використання традиційних дискретних шкал (балів) може призвести до втрати інформації про відтінки експертних суджень. Тому методика застосовує апарат теорії нечітких множин, що дозволяє математично оперувати лінгвістичними змінними [13].

Вхідні якісні параметри оцінюються експертами у термінах лінгвістичних змінних, наприклад: "Рівень прозорості"  $\in$  {Дуже низький, Низький, Середній, Високий, Дуже високий}. Кожному терму ставиться у відповідність нечітке число. У даній методиці пропонується використовувати трикутні нечіткі числа (Triangular Fuzzy Numbers), які задаються трійкою (a, b, c), де a – песимістична оцінка, b – найбільш ймовірна оцінка, c – оптимістична оцінка.

Функція належності  $\mu(x)$  трикутного числа визначається як:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (3.10)$$

Стандартизована шкала для фазифікації оцінок у діапазоні від 1 до 10:

- дуже низький (VL): (0, 0, 2.5);
- низький (L): (0, 2.5, 5);
- середній (M): (2.5, 5, 7.5);
- високий (H): (5, 7.5, 10);
- дуже високий (VH): (7.5, 10, 10).

Для отримання єдиної групової оцінки за кожним критерієм проводиться агрегація індивідуальних нечітких чисел експертів. Враховуючи результати етапу 1, використовується зважена сума, де вагами виступають нормовані коефіцієнти компетентності експертів  $w_{exp_i}$ . Якщо  $k$ -й експерт дав оцінку  $(a_k, b_k, c_k)$ , то агреговане число  $(\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c})$  розраховується:

$$\tilde{a} = \sum_{k=1}^N w_{exp_k} \cdot a_k; \quad \tilde{b} = \sum_{k=1}^N w_{exp_k} \cdot b_k; \quad \tilde{c} = \sum_{k=1}^N w_{exp_k} \cdot c_k. \quad (3.11)$$

Для інтеграції якісних показників у загальну модель необхідно перетворити агреговане нечітке число у чітке числове значення. Найбільш поширеним та надійним методом є метод центру тяжіння [13].

Для трикутного числа  $(a, b, c)$  чітке значення  $X_{crisp}$  розраховується за спрощеною формулою:

$$X_{crisp} = \frac{a+b+c}{3}. \quad (3.12)$$

Отримане значення нормується діленням на максимальне значення шкали (на 10), перетворюючись у коефіцієнт в діапазоні від 1 до 10.

Етап 5. Синтез інтегрального показника ефективності.

П'ятий етап є кульмінацією алгоритму, де відбувається згортка всіх нормованих кількісних та дефазифікованих якісних показників у єдиний інтегральний індекс ефективності блокчейн-рішення ( $I_{BC}$ ). Використовується модель адитивної згортки з урахуванням ієрархічної структури ваг, отриманих

на етапі АНР.

Загальна формула розрахунку:

$$I_{BC} = W_{Op} \sum_i w_{opi} P_{opi} + W_{Ec} \sum_j w_{ecj} P_{ecj} + W_{Str} \sum_k w_{strk} P_{strk} + W_{Sus} \sum_m w_{susm} P_{susm}, \quad (3.13)$$

де  $W_{Op}, W_{Ec}, W_{Str}, W_{Sus}$  – глобальні ваги векторів ефективності (операційний, економічний, стратегічний, сталий),  $\sum W = 1$ ;

$w_{...}$  – локальні ваги критеріїв усередині кожної групи;

$P_{...}$  – значення нормованих показників.

Етап 6. Інтерпретація результатів за шкалою бажаності Харрінгтона.

Отримане значення  $I_{BC}$  є абстрактним числом в інтервалі 0.00 до 1.00. Для прийняття управлінського рішення необхідно надати йому якісну інтерпретацію, яка б відображала ступінь «корисності» або «бажаності» проєкту модернізації. Для цього методика використовує психофізичну шкалу бажаності Харрінгтона. Ця шкала базується на емпірично встановлених інтервалах, що відповідають психологічному сприйняттю якості об'єкта.

Використання шкали Харрінгтона дозволяє конвертувати сухий математичний індекс у вербальну рекомендацію.

У таблиці 3.2 наведено шкалу бажаності Харрінгтона для інтерпретації ефективності блокчейн-проєкту.

Таблиця 3.2 – Шкала бажаності Харрінгтона для інтерпретації ефективності блокчейн-проєкту

Інтервал значення $I_{BC}$	Лінгвістична оцінка (рівень бажаності)	Інтерпретація та рекомендація щодо рішення
0.80 – 1.00	Дуже високий	Проєкт характеризується винятковою ефективністю. Синергія економічних, операційних та стратегічних ефектів максимальна. Рекомендується негайне впровадження та масштабування рішення.

Кінець таблиці 3.2

Інтервал значення $I_{BC}$	Лінгвістична оцінка (рівень бажаності)	Інтерпретація та рекомендація щодо рішення
0.63 – 0.80	Високий	Ефективність проекту висока. Блокчейн-рішення забезпечує суттєві переваги над традиційною системою. Рекомендується впровадження з плановим моніторингом показників.
0.37 – 0.63	Задовільний	Проект є прийнятним, але має «вузькі місця». Переваги не є радикальними або існують значні ризики. Потребує доопрацювання архітектури або бізнес-моделі перед запуском.
0.20 – 0.37	Низький	Ефективність нижча за очікувану. Витрати та складність перевищують потенційні вигоди. Рекомендується відкласти впровадження або кардинально переглянути технічне завдання.
0.00 – 0.20	Дуже низький	Проект неефективний. Застосування блокчейну для даної задачі є економічно та технологічно необґрунтованим. Рекомендується відмова від реалізації.

Критичною точкою прийняття рішення є значення 0.37 ( $1/e$ ). Якщо  $I_{BC} < 0.37$ , модернізація ЛПС на базі блокчейну визнається недоцільною. Значення в діапазоні 0.37 – 0.63 вказують на необхідність оптимізації рішення.

Етап 7. Аналіз чутливості.

З огляду на те, що вхідні дані (особливо прогностні обсяги транзакцій, вартість токенів/газу, експертні оцінки) містять елемент невизначеності, фінальним етапом є перевірка стійкості результату.

Аналіз чутливості передбачає розрахунок зміни інтегрального показника  $I_{BC}$  при варіації ключових параметрів на  $\pm 10\%$ ,  $\pm 20\%$ . Коефіцієнт еластичності  $E$  розраховується як:

$$E = \frac{\% \Delta I_{BC}}{\% \Delta P_{input}}. \quad (3.14)$$

Якщо незначна зміна вхідного параметра (наприклад, вартості впровадження) призводить до зміни категорії за шкалою Харрінгтона (наприклад, перехід з «Високий» у «Задовільний»), проект вважається чутливим

до ризиків, що вимагає розробки додаткових заходів з хеджування.

### 3.2 Порядок застосування критеріїв ефективності в рамках комплексного методу

Для забезпечення практичної реалізації алгоритму, описаного в підрозділі 3.1, необхідно деталізувати порядок застосування конкретних критеріїв ефективності. Критерії, ідентифіковані у другому розділі цієї роботи, вимагають чітких протоколів вимірювання та розрахунку, адаптованих до специфіки розподілених реєстрів.

#### 3.2.1 Протокол оцінювання операційно-технологічних критеріїв

Ця група критеріїв характеризує «фізику» процесів обміну даними та товарами. Їх вимірювання базується на порівнянні часових та якісних характеристик транзакцій.

Час циклу документообігу (Document Flow Cycle Time,  $\Delta T_{doc}$ ). Традиційні ЛС страждають від латентності, спричиненої послідовною передачею документів (EDI, email, папір). Блокчейн дозволяє паралельний доступ до «єдиної версії правди».

Методика «As-Is»: вибіркового аналізу (семплінг) історії замовлень за останній рік. Розраховується середній час між подією «Відвантаження товару» та подією «Підтвердження отримання документів всіма сторонами».

Методика «To-Be»: оцінка базується на технічній метриці Block Time (час генерації блоку) та Consensus Latency обраної платформи. Для Hyperledger Fabric цей час складає секунди (близько 2 – 5 с). До цього часу додається час виконання

смарт-контракту.

Розрахунок:

$$\Delta T_{doc} = T_{AsIs} - (T_{latency} + T_{smart\_contract}). \quad (3.15)$$

Час звірки даних це найбільш показовий критерій. У фрагментованих системах звірка рахунків та статусів може займати дні.

Протокол: фіксація людино-годин (FTE), що витрачаються відділами бухгалтерії та логістики на вирішення диспутів (dispute resolution) та узгодження розбіжностей у записах.

Блокчейн-ефект: оскільки всі учасники бачать один і той самий запис у реєстрі, потреба у звірці post-factum зникає. Час звірки прямує до нуля. У моделі цей показник для стану "To-Be" приймається рівним нулю або мінімальному технічному часу на перевірку хеш-суми.

Рівень наскрізної обробки це показник автоматизації, що визначає частку транзакцій, оброблених без ручного втручання.

Формула:

$$STP = \frac{N_{total} - N_{manual}}{N_{total}} \times 100\%, \quad (3.16)$$

де  $N_{manual}$  – кількість транзакцій, що вимагали ручної корекції, повторного введення даних або телефонних дзвінків для уточнення.

Застосування: впровадження IoT-сенсорів, що автоматично записують дані в блокчейн, дозволяє підвищити STP до значень, близьких до 100%.

### 3.2.2 Протокол оцінювання фінансово-економічних критеріїв

Економічна оцінка вимагає переходу від моделі локальної оптимізації до моделі оцінки вартості екосистеми.

Зниження адміністративних та транзакційних витрат ( $\Delta C_{admin}$ ):

- блокчейн зменшує потребу в бек-офісних операціях;
- склад витрат: включає витрати на друк, пересилку кур'єрськими службами, архівацію паперових документів, а також фонд оплати праці персоналу, що виконує рутинну роботу з введення даних;
- алгоритм:

$$\Delta C_{admin} = \sum_{k=1}^M (C_{process\_k}^{old} - C_{process\_k}^{new}). \quad (3.17)$$

При цьому для  $C^{new}$  враховуються нові витрати: вартість цифрових підписів, підтримка ключів безпеки.

Економія на посередниках.

- протокол: ідентифікація посередників у ланцюгу (експедитори, митні брокери, факторингові компанії, страхові агенти). Аналіз структури їх комісійних. Визначення функцій, які можуть бути замінені смарт-контрактом (наприклад, автоматичне списання коштів замість акредитиву);

- обмеження: враховується лише та частина комісії, що стосується інформаційного супроводу та гарантії довіри. Фізичні послуги (перевезення, вантажні роботи) залишаються.

Сукупна вартість володіння.

а) оцінка вартості блокчейн-рішення суттєво відрізняється від традиційного ПЗ;

б) компоненти TCO для блокчейну:

- 1) CAPEX: розробка смарт-контрактів, налаштування каналів, інтеграція з ERP (API шлюзи), аудит безпеки коду;

2) ОРЕХ: вартість хостингу вузлів у хмарі або on-premise, витрати на членство в консорціумі, транзакційні витрати (якщо використовується мережа з комісією за «газ»);

в) розрахунок: проводиться дисконтування потоків витрат на горизонті 3 – 5 років:

$$TCO = I_{initial} + \sum_{t=1}^T \frac{C_{maint_t} + C_{trans_t}}{(1+r)^t}. \quad (3.18)$$

### 3.2.3 Протокол оцінювання стратегічних та ESG критеріїв

Застосування цих критеріїв реалізується через процедури нечіткого моделювання, описані в підрозділі 3.1.

Індекс довіри.

– вимірювання: проведення анкетування серед ключових стейкхолдерів. Питання формулюються таким чином, щоб виявити рівень впевненості у даних партнера;

– приклад питання: «як часто ви перевіряєте дані про інвентаризацію, надані партнером X, перед тим як використовувати їх у власному плануванні?»;

– інтерпретація: відповіді «завжди» відповідають низькому рівню довіри, «ніколи» – високому. Ці відповіді конвертуються у нечіткі числа.

Глибина та покриття простежуваності.

– метрика: відсоток номенклатурних позицій, для яких система дозволяє відновити повну генеалогію за час менше 1 хвилини;

– застосування: у традиційній системі запит «з якої партії сировини виготовлено цей конкретний йогурт?» може вимагати запитів до 3 – 4 різних компаній і займати дні. Блокчейн дозволяє миттєвий граф-запит.

Сталість та вуглецевий слід. У зв'язку з впровадженням механізму СВМ (Carbon Border Adjustment Mechanism) в ЄС, точність даних про викиди має

фінансовий вимір.

– критерій: здатність системи надати верифікований, незмінний доказ та розрахунок викидів Score 3 для кожної партії товару. Оцінюється бінарно (так/ні) або за рівнем деталізації (партія / одиниця продукції).

Таким чином, сформований у третьому розділі методичний апарат, що включає деталізований алгоритм, математичні моделі АНР та нечіткої логіки, а також чіткі протоколи вимірювання критеріїв, створює цілісну основу для проведення апробації методу. Такий підхід дозволяє перевести дискусію про блокчейн з площини «технологічного хайпу» у площину прагматичного інженерно-економічного розрахунку, що є необхідною передумовою для прийняття зважених рішень щодо цифрової трансформації логістики.

## 4 АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Загальний опис логістичної інформаційної системи ХПП для проведення апробації

4.1.1 Характеристика об'єкта дослідження та системний аналіз логістичних процесів стану «As-Is»

В умовах сучасної аграрної логістики, яка характеризується високим ступенем невизначеності та фрагментації, вибір репрезентативного об'єкта дослідження є критично важливим для валідації теоретичних моделей [17, 24]. Для проведення експериментальної апробації розробленого МБСО, в якості об'єкта було обрано типове Хлібоприймальне підприємство, розташоване в центрі України. Даний об'єкт характеризується паспортною потужністю одночасного зберігання 50 000 тонн зернових культур, річним вантажообігом близько 120 000 тонн та наявністю власної залізничної гілки. Вибір саме такого типу підприємства зумовлений тим, що воно виступає вузловим елементом у ланцюгу постачання «Фермер – Елеватор – Порт – Глобальний споживач», концентруючи в собі всі ключові логістичні, інформаційні та фінансові потоки, а також, на жаль, основні ризики та неефективності традиційної моделі управління.

Детальний аудит та картування бізнес-процесів ХПП у стані «As-Is» дозволили ідентифікувати комплекс системних проблем, які виходять за межі простої технічної застарілості і мають структурний характер. Логістична екосистема підприємства функціонує в умовах низького рівня довіри між учасниками. Ключовими стейкхолдерами взаємодії є: фермерські господарства (постачальники), трейдери (покупці), експедиторські компанії (авто та залізничні перевезення), незалежні сюрвейери (контроль якості), банківські установи (фінансування під заставу зерна) та державні регулюючі органи.

Під час аналіз інформаційних потоків, проведеного в ході передпроектного обстеження, було виявлено наведені нижче критичні вразливості системи «As-

Is», які безпосередньо впливають на ефективність логістики.

По-перше, спостерігається тотальна фрагментація даних. Кожен з учасників ланцюга використовує власну, ізольовану облікову систему. ХПП використовує спеціалізовану конфігурацію «1С: Елеватор», трейдери часто працюють у глобальних системах SAP або Oracle, перевізники використовують різноманітні TMS-рішення, а фермерські господарства часто обмежуються електронними таблицями Excel або паперовими журналами. Відсутність єдиного стандарту обміну даними та інтегрованості призводить до необхідності ручного дублювання інформації на кожному етапі передачі відповідальності. Це не лише генерує значні адміністративні витрати, але й створює часові лаги, коли інформація про надходження вантажу стає доступною трейдеру лише через 24 – 48 годин після фізичної події.

По-друге, критичною проблемою залишається залежність від паперового документообігу та низька швидкість фіналізації транзакцій. Основними юридично значущими документами залишаються паперова товарно-транспортна накладна та складські квитанції на зерно (форми №13, №36, №37). Процес оформлення приймання зерна вимагає фізичної присутності водія, вагара, лаборанта та бухгалтера, а також проставлення мокрих печаток. Будь-яка помилка в документі, виявлена на етапі відвантаження в порту, запускає складний процес повернення документів та їх перевипуску, що може заблокувати оплату на тижні.

По-третє, і це є специфікою аграрної логістики, існує високий ризик маніпуляцій з якісними показниками зерна. Оскільки вартість партії зерна критично залежить від показників вологості, смітцевої домішки та вмісту білка, саме етап лабораторного аналізу є точкою концентрації корупційних ризиків. У поточній системі лаборант вносить дані з приладів у журнал або локальну базу даних вручну. Це створює можливість для викривлення даних: завищення смітцевої домішки для фермера або заниження вологості для трейдера. Відсутність незмінного цифрового сліду від вимірювального приладу до облікового запису робить пост-аудит практично неможливим, що руйнує довіру

між партнерами та призводить до нескінченних арбітражних спорів.

По-четверте, спостерігається неефективність фінансових механізмів. Банки, які кредитують аграріїв під заставу зерна на зберіганні, не мають інструментів для моніторингу наявності та стану застави в реальному часі. Це змушує їх закладати високі ризики у вартість кредитування та вимагати надлишкового паперового підтвердження, що сповільнює оборотність капіталу в галузі.

На основі цього діагностичного аналізу було сформовано детальне технічне завдання для розробки цільової моделі «To-Be» – інтегрованої логістичної інформаційної системи на базі технології блокчейн, яка отримала робочу назву «AgriTrust-DLT» [21]. Система покликана не просто автоматизувати існуючий хаос, а реінжинірити процеси взаємодії, створивши єдиний простір довіри.

#### 4.1.2 Архітектура, топологія мережі та вибір технологічного стеку системи «AgriTrust-DLT»

Проектування архітектури системи «AgriTrust-DLT» здійснювалося у суворій відповідності до вимог. Фундаментальним рішенням став вибір типу розподіленого реєстру. Враховуючи високі вимоги до конфіденційності комерційної інформації (ціни контрактів, обсяги поставок, клієнтські бази є суворою комерційною таємницею), використання публічних permissionless блокчейнів (типу Ethereum Mainnet) було визнано неприйнятним.

В якості технологічної основи обрано платформу корпоративного класу Hyperledger Fabric. Цей фреймворк дозволяє створювати модульну архітектуру, де всі учасники мережі є ідентифікованими та авторизованими, але при цьому зберігається децентралізація управління.

Мережева інфраструктура системи спроектована як консорціум, що

об'єднує ключових учасників логістичного процесу. Топологія включає наступні типи вузлів:

- реєр-вузли ХПП (Elevator Node): це ключові вузли, що розміщуються в захищеному периметрі ІТ-інфраструктури елеватора. Вони виконують роль Endorsing Peers (вузлів, що симулюють та підписують транзакції) для операцій приймання, сушіння, підробітку та відвантаження зерна. ХПП є утримувачем повної історії транзакцій в межах своїх каналів;

- реєр-вузли Трейдера (Trader Node): вузли, що належать компаніям-покупцям. Вони мають права перегляду стану складських квитанцій та ініціювання транзакцій зміни власника. Ці вузли забезпечують трейдерам прозорість запасів у реальному часі без необхідності надсилати запити менеджерам елеватора;

- реєр-вузли Банку/Фінансового партнера (Bank Node): вузли з правами доступу «auditor» до активів, що знаходяться в заставі. Це дозволяє банку автоматично моніторити забезпечення кредитів та, через механізм смарт-контрактів, автоматично списувати або розблоковувати кошти при виконанні умов поставки;

- служба впорядкування (Ordering Service): для забезпечення консенсусу в мережі обрано алгоритм Raft [12, 19]. На відміну від енергоємного Proof-of-Work (майнінгу), Raft забезпечує високу пропускну здатність (тисячі транзакцій на секунду) та низьку латентність, що критично для операційних процесів реального часу. Механізм Crash Fault Tolerance гарантує стійкість системи навіть у випадку технічного збою кількох вузлів;

- IoT-шлюзи (Oracle Nodes): спеціалізовані легкі клієнти, інтегровані з промисловим обладнанням (автомобільні ваги, лабораторні аналізатори Infrates, витратоміри газу на сушарках). Їх функція – криптографічний підпис первинних даних безпосередньо на пристрої, що унеможливорює втручання оператора перед записом у блокчейн.

Унікальною особливістю Hyperledger Fabric, яка стала вирішальною при виборі, є механізм каналів. У системі «AgriTrust-DLT» реалізовано

розмежування видимості даних:

- канал «Global»: загальнодоступний реєстр сертифікатів відповідності та реєстр учасників;
- приватні канали «Elevator-Trader A», «Elevator-Trader B»: дані про угоди, ціни та обсяги конкретного трейдера доступні лише йому та елеватору. Трейдер А фізично не може побачити транзакції Трейдера В, навіть перебуваючи в одній мережі, що повністю задовольняє вимоги антимонопольного законодавства та комерційної таємниці.

#### 4.1.3 Бізнес-логіка та специфікація смарт-контрактів

«Інтелект» системи реалізовано через набір смарт-контрактів (Chaincode), розроблених мовою Go. Вони автоматизують виконання бізнес-правил та забезпечують незмінність логіки взаємодії. Система включає три основні класи контрактів:

а) смарт-контракт «Цифровий паспорт партії». Цей контракт ініціюється в момент перетину автомобілем КПП елеватора:

1) вхідні дані: ID RFID-мітки автомобіля, дані з електронних ваг (вага бруutto), дані лабораторного аналізу (вологість, сміття, білок);

2) логіка: контракт автоматично перевіряє відповідність показників якості базисним кондиціям контракту. Якщо показники в нормі, генерується токенизована складська квитанція. Якщо відхилення перевищують допустимі норми, контракт автоматично блокує розвантаження або розраховує розмір знижки (дюкоту), виключаючи суб'єктивний фактор домовленостей;

3) результат: створення незмінного цифрового активу, який миттєво стає видимим для власника вантажу та банку.

б) смарт-контракт «Автоматичний кліринг та розрахунки». Цей контракт

вирішує проблему касових розривів та довіри при оплаті. Він реалізує принцип «Delivery versus Payment»:

1) логіка: як тільки право власності на зерно (цифрову квитанцію) передається від Фермера до Трейдера в реєстрі, смарт-контракт автоматично ініціює платіжну інструкцію в банківській системі (через API інтеграцію) або здійснює трансфер стейблкоїнів (якщо законодавство дозволяє);

2) перевага: усувається необхідність у акредитивах та ескроу-рахунках, оскільки блокчейн виступає гарантом виконання угоди;

в) смарт-контракт «Життєвий цикл зберігання». Відстежує фізичні перетворення зерна:

1) логіка: при сушінні зерна вага зменшується через випаровування вологи. Смарт-контракт автоматично перераховує залікову вагу партії за формулою Дюваля, базуючись на даних газових лічильників та датчиків температури сушарки. Це унеможлиблює «крадіжку на усушці», коли елеватор списує більше ваги, ніж реально втрачено.

#### 4.1.4 Інтеграційний рівень та управління даними

З огляду на проблему масштабованості блокчейну та недоцільність зберігання в ньому великих файлів (скан-копії, фото, відео), в системі реалізовано гібридну схему зберігання даних, що відповідає рекомендаціям:

– on-chain: зберігаються лише критичні метадані (ID партії, вага, показники якості, статуси, фінансові зобов'язання) та криптографічні хеші документів (SHA-256). Це забезпечує легкість та швидкодію реєстру;

– off-chain: «важкі» дані (фотофіксація кузова автомобіля, повні тексти договорів, технічні логи обладнання) зберігаються в розподіленій файловій системі IPFS або захищеному хмарному сховищі S3. Зв'язок забезпечується через

запис Content Addressable Hash у транзакцію блокчейну. Це гарантує, що файл не може бути підмінений, оскільки будь-яка зміна в файлі призведе до зміни його хешу, що не співпадає з записом у блокчейні.

Інтеграція з існуючими ERP-системами (наприклад, 1С бухгалтерія) реалізована через двосторонній API Gateway. Користувачам не потрібно встановлювати нове ПЗ; вони продовжують працювати у звичних інтерфейсах, а спеціальний адаптер у фоновому режимі транслює операції в транзакції блокчейну.

Така архітектура дозволяє створити цілісну, захищену та прозору екосистему, яка готова до проведення експериментальної оцінки її ефективності.

#### 4.2 Практичне застосування розробленого комплексного методу на прикладі логістичної інформаційної системи ХПП

Експериментальна частина роботи, присвячена безпосередній апробації МБСО ефективності блокчейн-технологій. Процедура оцінювання була проведена у повній відповідності до розробленого алгоритму, що включає п'ять послідовних етапів.

##### 4.2.1 Формування експертної групи та верифікація компетентності

Враховуючи, що оцінка стратегічних та сталих ефектів впровадження блокчейну значною мірою базується на якісних судженнях (через складність їх прямої монетизації), критичним фактором достовірності результатів є якість експертної панелі. Для проведення дослідження було сформовано міждисциплінарну робочу групу з семи провідних фахівців галузі.

Процедура відбору базувалася на розрахунку інтегрального коефіцієнта компетентності ( $K_{comp}$ ) для кожного кандидата, що враховує як рівень теоретичних знань ( $K_z$ ), так і структуру джерел аргументації ( $K_a$ ).

До складу групи увійшли фахівці, що представляють різні, часто конфліктуючі сторони логістичного процесу, що дозволило забезпечити збалансованість оцінок:

- експерт 1 та 2 (Logistics Domain): директори з логістики великих агрохолдингів (земельний банк > 100 тис. га);
- експерт 3 та 4 (Tech Domain): системні архітектори з досвідом впровадження DLT-рішень у ланцюгах постачання;
- експерт 5 (Finance Domain): фінансовий аналітик, спеціаліст з торгового фінансування та хеджування ризиків;
- експерт 6 (Compliance Domain): незалежний експерт-інспектор, аудитор систем якості ISO;
- експерт 7 (Academic Domain): науковий консультант, фахівець з математичного моделювання.

Для кожного експерта було розраховано нормований ваговий коефіцієнт ( $w_{exp}$ ), який визначає "силу голосу" експерта при агрегації групових рішень. Результати розрахунку наведено в Таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Матриця компетентності експертної групи

ID Експерта	Профіль (Домен)	Коеф. інформованості ( $K_z$ )	Коеф. аргументації ( $K_a$ )	Коеф. компетентності ( $K_{comp}$ )	Нормована вага ( $w_{exp}$ )
EXP_01	Логістика (Агро)	0.9	0.95	0.925	0.148
EXP_02	Логістика (Трансп.)	0.85	0.9	0.875	0.14
EXP_03	ІТ / Blockchain	0.95	0.85	0.9	0.144
EXP_04	ІТ / Integration	0.9	0.8	0.85	0.136
EXP_05	Фінанси	0.8	0.9	0.85	0.136
EXP_06	Якість / Аудит	0.95	0.95	0.95	0.152

Кінець таблиці 4.1

ID Експерта	Профіль (Домен)	Коеф. інформованості ( $K_z$ )	Коеф. аргументації ( $K_a$ )	Коеф. компетентності ( $K_{comp}$ )	Нормована вага ( $w_{exp}$ )
EXP_07	Наука	0.9	0.9	0.9	0.144
Всього				$\Sigma = 6.25$	1

Високе середнє значення компетентності групи ( $K_{avg} = 0.89$ ) свідчить про високу надійність експертної панелі.

#### 4.2.2 Визначення вагових коефіцієнтів методом аналізу ієрархій

Наступним кроком стало визначення відносної важливості чотирьох векторів ефективності (операційного, економічного, стратегічного, сталого) для специфіки діяльності ХПП. Використання методу аналізу ієрархій АНР дозволило математично формалізувати пріоритети бізнесу.

Експертам було запропоновано заповнити матриці парних порівнянь, використовуючи 9-бальну шкалу Сааті. Питання ставилося наступним чином: «наскільки Вектор А є важливішим за Вектор В для успішного функціонування ХПП в довгостроковій перспективі?». Узагальнена матриця порівнянь, отримана шляхом геометричного усереднення індивідуальних матриць експертів, представлена в Таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Узагальнена матриця парних порівнянь векторів ефективності

Вектори	Операційний	Економічний	Стратегічний	Сталий (ESG)	Власний вектор (Вага $W_i$ )
Операційний	1	3	2	5	0.42
Економічний	0.33	1	0.5	3	0.16
Стратегічний	0.5	2	1	4	0.31
Сталий (ESG)	0.2	0.33	0.25	1	0.11

Для верифікації логічної узгодженості отриманих суджень було проведено розрахунок відношення узгодженості CR:

- розраховано максимальне власне число матриці  $\lambda_{max} = 4.18$ ;
- розраховано Індекс Узгодженості (Consistency Index):  $CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} = \frac{4.18-4}{3} = 0.06$ ;
- розраховано Відношення Узгодженості:  $CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.06}{0.90} = 0.067$ .

Оскільки значення  $CR = 6.7\%$  є меншим за порогові  $10\%$ , матриця суджень визнається узгодженою, а отримані ваги – достовірними.

Результати показують, що для ХПП пріоритетним є операційний вектор ( $W = 0.42$ ), що відображає критичну важливість швидкості обробки вантажів у піковий сезон (жнива), коли година простою коштує величезних грошей. На другому місці – стратегічний вектор ( $W = 0.31$ ), що підтверджує тезу про дефіцит довіри на ринку. Пряма економічна економія ( $W = 0.16$ ) виявилася менш значущою, що свідчить про готовність бізнесу інвестувати в технологію не заради скорочення штату, а заради якості сервісу та репутації.

На рисунку 4.1 зображено вагомість векторів ефективності за результатами АНР.

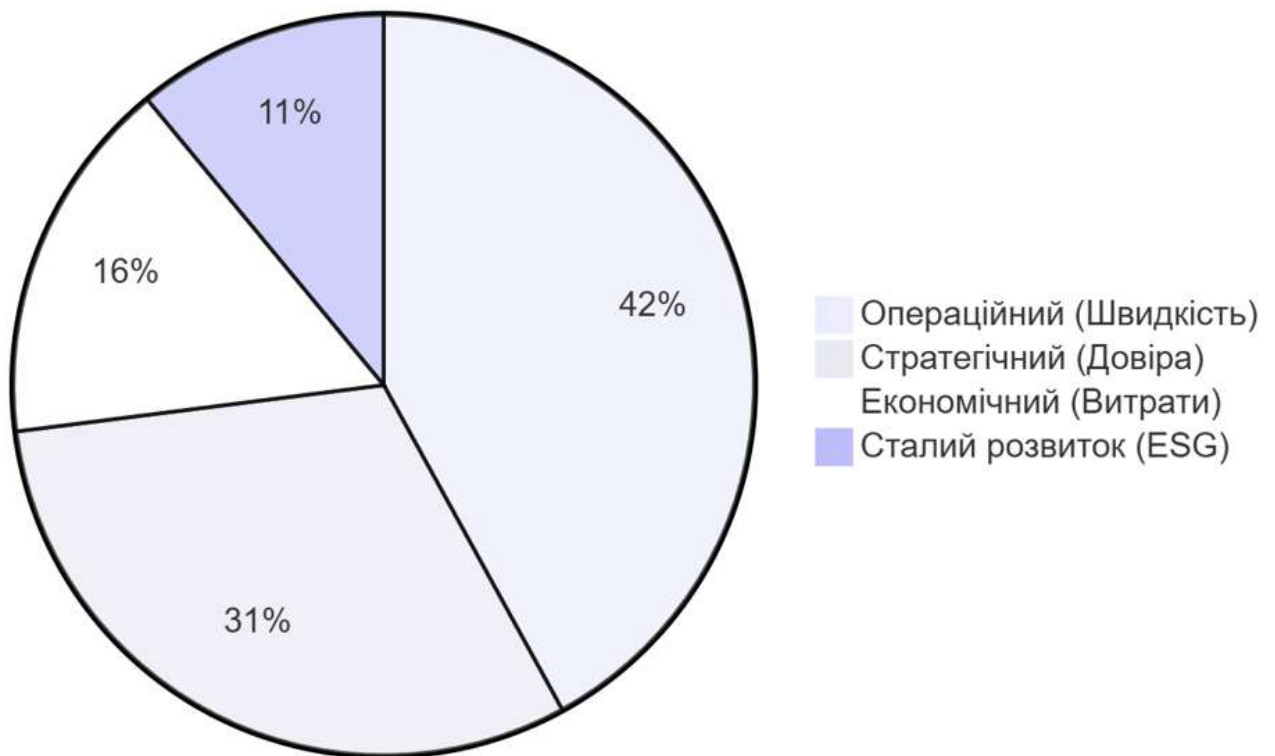


Рисунок 4.1 – Вагомість векторів ефективності за результатами АНР

#### 4.2.3 Симуляційне моделювання та оцінка кількісних показників

Для наповнення моделі емпіричними даними було проведено імітаційне моделювання проходження партії зерна обсягом 1000 тонн (приблизно 40 автопоїздів) через бізнес-процеси «As-Is» та «To-Be».

Аналіз операційно-технологічної ефективності. Фокус аналізу було зосереджено на часових параметрах циклу та показниках надійності даних. Вимірювання для стану «As-Is» базувалися на аналізі журналів в'їзду-виїзду та таймінгу ІС за минулий маркетинговий рік. Для стану «To-Be» використовувалися бенчмарки пропускну здатності Hyperledger Fabric (при середньому навантаженні 200 TPS) та час виконання смарт-контрактів. Результати порівняльного аналізу наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Порівняльний аналіз операційних показників (дані на партію 1000 тон)

Показник (KPI)	Од. вим.	«As-Is» (Традиційна)	«To-Be» (Блокчейн)	Абсолютне відхилення	Нормований бал ( $P_{op}$ )
Час циклу документообігу ( $\Delta T_{doc}$ )	Хв.	2880 (48 год)	25 (0.4 год)	-99.10%	1
Час звірки розбіжностей	Год/міс	160	0.5	-99.70%	1
Рівень наскрізної обробки (STP)	%	45%	98%	+53 п.п.	0.95
Час перебування авто на території	Хв.	240	90	-62.50%	0.85

Найбільш драматичне покращення спостерігається у показнику часу документообігу. Це пояснюється тим, що в традиційній системі паперові документи рухаються послідовно і часто із запізненням відносно вантажу. Блокчейн забезпечує паралельний доступ до «єдиної версії правди» для всіх учасників миттєво після фіналізації блоку. Показник STP зріс до 98% завдяки інтеграції IoT-ваг, що усунуло необхідність ручного введення даних вагарем.

Аналіз фінансово-економічної ефективності. Розрахунок економічної ефективності проводився за розширеною моделлю TCO та оцінкою екосистемних ефектів. Моделювання проводилося на горизонті 3 років з урахуванням дисконтування. Враховано наступні фактори економії:

- зменшення фонду оплати праці (ФОП) обліковців та архіваріусів;
- зменшення штрафів за простій транспорту завдяки прискоренню оборотності;
- зниження вартості залученого капіталу завдяки прозорості застави для банку (зниження ризикової премії на 1-1.5%).

Таблиця 4.4 – Розрахунок економічного ефекту (тис. грн / рік)

Категорія витрат/доходів	«As-Is»	«To-Be»	Ефект ( $\Delta$ )
Адміністративні витрати (персонал, папір, архів)	1 350	310	+1 040
Логістичні втрати (штрафи, простой вагонів)	960	192	+768
Юридичні витрати (арбітраж, спори по якості)	250	20	+230
Вартість фінансування (економія на % ставці)	-	-	+1 200
Gross Benefit (сукупна вигода)			+3 238

## Кінець таблиці 4.4

Категорія витрат/доходів	«As-Is»	«To-Be»	Ефект ( $\Delta$ )
(-) Витрати на впровадження (CAPEX амортизація)	0	500	-500
(-) Підтримка системи (OPEX, Cloud, Support)	0	450	-450
Net Benefit (чистий ефект)			+2 288

Розрахований ROI становить:  $ROI = \frac{2288}{950} \times 100\% \approx 240\%$ . Такий високий показник пояснюється ефектом масштабу та значним впливом вартості фінансування в оборотному капіталі зернотрейдингу. Нормоване значення показника економічної ефективності:  $P_{ec} = 1.0$ .

## 4.2.4 Нечітке моделювання якісних показників

Для оцінки стратегічного та сталого векторів, які важко виміряти в гривнях, було застосовано апарат нечіткої логіки. Експерти оцінювали параметри в лінгвістичних термінах (дуже низький – дуже високий), які потім трансформувалися у трикутні нечіткі числа.

Стратегічний вектор. Ключовий критерій: «ступінь захищеності від маніпуляцій з якістю (Fraud Resistance)». В системі «As-Is» цей показник оцінювався експертами переважно як «низький» (L) через людський фактор. В системі «To-Be» завдяки IoT-оракулам та незмінності реєстру оцінка зросла до «дуже високий» (VH). Агрегація думок експертів з урахуванням їх ваги дала наступне нечітке число для «To-Be»:  $\widetilde{A}_{str} = (7.2, 9.1, 10.0)$ . Після дефазифікації отримано чітке значення:  $X_{str} = 8.76$ . Нормоване значення:  $P_{str} = 0.88$ .

Сталий вектор. Ключовий критерій: "можливість верифікації вуглецевого сліду. Це стає критичним з введенням в ЄС механізму CBAM. Традиційна система не дозволяє точно підрахувати викиди на тону зерна (оцінка «дуже низький»). Блокчейн дозволяє акумулювати дані про пробіг кожного авто та енергоспоживання сушарки для кожної партії. Дефазифіковане значення оцінки

«To-Be»:  $X_{sus} = 7.90$ . Нормоване значення:  $P_{sus} = 0.79$ .

### 4.3 Аналіз результатів та сценарії впровадження

#### 4.3.1 Розрахунок інтегрального індексу та його інтерпретація

Фінальним етапом аналізу є синтез усіх отриманих показників у єдиний Інтегральний Індекс Ефективності Блокчейн-рішення ( $I_{BC}$ ) за моделлю адитивної згортки.

$$I_{BC} = W_{op} \cdot P_{op} + W_{ec} \cdot P_{ec} + W_{str} \cdot P_{str} + W_{sus} \cdot P_{sus}. \quad (4.1)$$

Підставляючи отримані значення:

- вклад операційної ефективності:  $0.42 \times 0.96 = 0.403$ ;
- вклад економічної ефективності:  $0.16 \times 1.00 = 0.160$ ;
- вклад стратегічної ефективності:  $0.31 \times 0.88 = 0.273$ ;
- вклад сталої ефективності:  $0.11 \times 0.79 = 0.087$ .

Сумарний індекс  $I_{BC} = 0.923$ .

Згідно зі шкалою бажаності Харрінгтона, значення в діапазоні [0.80 – 1.00] інтерпретується як «дуже високий» рівень ефективності та перспективності проєкту. Це свідчить про те, що перехід на блокчейн-платформу «AgriTrust-DLT» здатен забезпечити якісний стрибок у розвитку логістичної системи ХПП, трансформуючи її з обслуговуючої функції у джерело конкурентної переваги. Отриманий результат (0.923) є надзвичайно високим і зумовлений синергією: усунення паперової рутини (операційний ефект) мультиплікується зростанням довіри трейдерів (стратегічний ефект), що разом дає фінансовий результат.

### 4.3.2 Багатоваріантний аналіз чутливості та сценарне моделювання

Розуміючи, що будь-яка модель є спрощенням реальності, критично важливо перевірити стійкість отриманого результату до зміни зовнішніх та внутрішніх факторів. Було проведено стрес-тестування моделі за трьома сценаріями розвитку подій.

Сценарій 1: «опір екосистеми»:

- гіпотеза: ХПП впровадило систему, але 70% дрібних фермерів та перевізників відмовляються від переходу на цифрові гаманці, продовжуючи вимагати паперові документи;

- наслідок: виникає необхідність подвійного введення даних (Double Entry) – в блокчейн та на папір. Операційна ефективність ( $P_{op}$ ) падає з 0.96 до 0.50. Економічна економія зникає через необхідність утримувати старий штат;

- результат:  $I_{BC} \approx 0.58$ . Це переводить проєкт у категорію «задовільний»;

- висновок: технологія сама по собі не працює без організаційних змін. Критичним фактором успіху є онбординг партнерів. Необхідно впроваджувати програму лояльності (знижки на перевалку) для тих, хто переходить на «цифру».

Сценарій 2 «регуляторний тиск»:

- гіпотеза: держава вводить обов'язкову вимогу щодо повної простежуваності ланцюга постачання (як це планується в рамках гармонізації з законодавством ЄС);

- наслідок: вага сталого ( $W_{sus}$ ) та стратегічного ( $W_{str}$ ) векторів різко зростає (до 0.6 у сумі). Традиційні системи «As-Is» стають нездатними виконувати ліцензійні умови (їх ефективність падає до 0);

- результат: цінність блокчейн-рішення стає абсолютною ( $I_{BC} \rightarrow 1.0$ ). У цьому сценарії впровадження стає питанням виживання бізнесу, а не просто оптимізації.

Сценарій 3 «технологічний збій»:

- гіпотеза: виявлено вразливість у смарт-контракті або збій роботи IoT-

сенсорів (розкалібровка);

- наслідок: втрата довіри до системи. Показник  $P_{str}$  падає до 0.2;
- висновок: це підкреслює необхідність регулярного зовнішнього аудиту коду смарт-контрактів та процедур перевірки обладнання. Блокчейн гарантує незмінність даних, але не їх істинність, якщо джерело (сенсор) скомпрометовано.

#### 4.3.3 Рекомендації щодо впровадження

На основі проведеного аналізу сформульовано дорожню карту модернізації ЛІС ХПП:

- фаза «пілот» (0 – 6 міс): розгортання Hyperledger Fabric у тестовому режимі паралельно з існуючою системою. Обмежене коло учасників (ХПП + 1 Трейдер + 1 Банк). Фокус на відлагодженні смарт-контрактів приймання;
- фаза «екосистема» (6-18 міс): інтеграція IoT-ваг та лабораторії. Залучення перевізників через мобільний додаток. Відмова від внутрішнього паперообігу;
- фаза «мережевий ефект» (18+ міс): токенизація активів, запуск вторинного ринку складських квитанцій, інтеграція з державними реєстрами.

Підсумовуючи, апробація підтвердила, що впровадження блокчейн-технологій у логістику ХПП є економічно обґрунтованим та стратегічно необхідним кроком. Отримані результати дають керівництву підприємства науково обґрунтовану базу для прийняття інвестиційного рішення, переходячи від інтуїтивних очікувань до чітких, вимірюваних показників ефективності.

## ВИСНОВКИ

У ході кваліфікаційної роботи детально вивчено методи та моделі оцінювання ефективності впровадження інформаційних технологій у логістиці. На основі аналізу запропоновано комплексний метод, який забезпечує об'єктивну оцінку доцільності використання технології блокчейн у ланцюгах постачання.

Аналіз предметної області допоміг чітко окреслити проблеми традиційних логістичних систем, такі як фрагментація даних та низький рівень довіри, а також сформулювати вимоги до архітектури розподілених реєстрів. Вивчення наявних підходів разом із науковими матеріалами виявило слабкі й сильні сторони існуючих методик. Традиційні фінансові методи ефективні для оцінки прямих грошових потоків, проте не враховують мережеві ефекти та нематеріальні активи; і навпаки, якісні методи фокусуються на стратегічних аспектах, однак часто страждають від суб'єктивізму та складності вимірювання.

Досліджено чотири вектори ефективності: операційний, економічний, стратегічний та сталий. На основі цього окреслено ключові критерії оцінювання. Виявилось, що інтеграція кількісних та якісних показників робить оцінку більш збалансованою. З урахуванням отриманих даних створено метод багатовимірною синергетичного оцінювання, який об'єднує розрахунок фінансових метрик із нечітким моделюванням рівня довіри та прозорості. Упровадження методики дало можливість математично формалізувати стратегічні переваги технології та звести їх до єдиного інтегрального показника.

Експериментальна апробація на прикладі хлібоприймального підприємства показала, що запропонований метод працює коректно та дозволяє виявити приховані резерви ефективності. Розрахований інтегральний індекс виявився високим, підтвердивши, що синергія від автоматизації документообігу та підвищення довіри значно перевищує витрати на впровадження. Такі дані свідчать про те, що комплексний підхід має вирішальне значення для

обґрунтування інноваційних проектів.

Таким чином, результати дослідження можна застосувати для модернізації логістичних інформаційних систем промислових підприємств – зокрема, для обґрунтування інвестицій у блокчейн-платформи. Це також дає основу для прийняття зважених управлінських рішень, переходячи від інтуїтивних очікувань до чітких інженерно-економічних розрахунків.

Роботу виконано відповідно до вимог щодо розробки та оформлення кваліфікаційних робіт [26], а також із дотриманням положень державних стандартів ДСТУ 3008:2015 [27] і ДСТУ 8302:2015 [28].

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Hofmann, E., & Rüsч, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. URL: [https://www.researchgate.net/publication/316362471\\_Industry\\_40\\_and\\_the\\_current\\_status\\_as\\_well\\_as\\_future\\_prospects\\_on\\_logistics](https://www.researchgate.net/publication/316362471_Industry_40_and_the_current_status_as_well_as_future_prospects_on_logistics) (дата звернення: 27.11.2025).
2. Deloitte. (2020). Using blockchain to drive supply chain transparency. Deloitte Report/White Paper. URL: <https://www.deloitte.com/us/en/services/consulting/articles/blockchain-supply-chain-innovation.html> (дата звернення: 27.11.2025).
3. Iansiti, M., & Lakhani, K. R. (2017). The Truth About Blockchain. Harvard Business Review. URL: <https://hbr.org/2017/01/the-truth-about-blockchain> (дата звернення: 27.11.2025).
4. Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. International Journal of Information Management. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005> (дата звернення: 27.11.2025).
5. Queiroz, M. M., & Wamba, S. F. (2019). Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation. URL: <https://ideas.repec.org/a/eee/ininma/v46y2019icp70-82.html> (дата звернення: 28.11.2025).
6. Ar, A., et al. (2020). Evaluating the Feasibility of Blockchain in Logistics Operations: A Decision Framework. MDPI. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341307211\\_Evaluating\\_the\\_Feasibility\\_of\\_Blockchain\\_in\\_Logistics\\_Operations\\_A\\_Decision\\_Framework](https://www.researchgate.net/publication/341307211_Evaluating_the_Feasibility_of_Blockchain_in_Logistics_Operations_A_Decision_Framework) (дата звернення: 28.11.2025).
7. Chen, Y., et al. (2022). The Effect of Blockchain Technology on Supply Chain Collaboration: A Case Study of Lenovo. Systems. URL: <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/6/299> (дата звернення: 28.11.2025).
8. PwC. (2020). Time for trust: The trillion-dollar reasons to rethink

blockchain. URL: <https://www.pwc.com.cy/en/issues/assets/blockchain-time-for-trust.pdf> (дата звернення: 28.11.2025).

9. Parker, G. G., Van Alstyne, M. W., & Choudary, S. P. (2016). Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy. URL: [https://www.researchgate.net/publication/347525686\\_Geoffrey\\_G\\_Parker\\_Marshall\\_W\\_van\\_Alstyne\\_Sangeet\\_Paul\\_Choudary\\_Platform\\_revolution\\_How\\_networked\\_markets\\_are\\_transforming\\_the\\_economy\\_and\\_how\\_to\\_make\\_them\\_work\\_for\\_you](https://www.researchgate.net/publication/347525686_Geoffrey_G_Parker_Marshall_W_van_Alstyne_Sangeet_Paul_Choudary_Platform_revolution_How_networked_markets_are_transforming_the_economy_and_how_to_make_them_work_for_you) (дата звернення: 28.11.2025).

10. Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83-98. URL: <https://www.Inderscienceonline.com/doi/abs/10.1504/IJSSCI.2008.017590> (дата звернення: 01.12.2025).

11. Christidis, K., & Devetsikiotis, M. (2016). Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*, 4, 2292-2303. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7467408> (дата звернення: 01.12.2025).

12. Androulaki, E., et al. (2018). Hyperledger Fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. *EuroSys '18: Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference*. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3190508.3190538> (дата звернення: 01.12.2025).

13. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X> (дата звернення: 01.12.2025).

14. Реуна, А., et al. (2018). On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 88, 173-190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.05.046> (дата звернення: 01.12.2025).

15. Saberi, S., et al. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2018.1533261>. (дата звернення: 01.12.2025).

16. Tapscott, D., & Tapscott, A. (2016). *Blockchain Revolution: How the*

Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World. Penguin. URL: [https://books.google.com.ua/books/about/Blockchain\\_Revolution.html](https://books.google.com.ua/books/about/Blockchain_Revolution.html) (дата звернення: 01.12.2025).

17. Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldó, F. X. (2019). The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640-652. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.07.034> (дата звернення: 02.12.2025).

18. NIST. (2018). Blockchain Technology Overview (NISTIR 8202). National Institute of Standards and Technology. URL: <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8202> (дата звернення: 02.12.2025).

19. Cachin, C., & Vukolić, M. (2017). Blockchain Consensus Protocols in the Wild. arXiv preprint arXiv:1707.01873. URL: <https://arxiv.org/abs/1707.01873>.

20. Crosby, M., et al. (2016). Blockchain technology: Beyond bitcoin. *Applied Innovation*, 2(6-10), 71. URL: <https://j2-capital.com/wp-content/uploads/2017/11/AIR-2016-Blockchain.pdf> (дата звернення: 03.12.2025).

21. World Economic Forum. (2020). Redesigning Trust: Blockchain Deployment Toolkit. URL: <https://widgets.weforum.org/blockchain-toolkit/> (дата звернення: 03.12.2025).

22. ISO 22739:2020. Blockchain and distributed ledger technologies — Vocabulary. URL: <https://www.iso.org/standard/82208.html> (дата звернення: 04.12.2025).

23. Gartner. (2022). Gartner Hype Cycle for Blockchain and Web3. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/what-is-web3> (дата звернення: 04.12.2025).

24. Кравченко, О. В. (2021). Цифрова трансформація логістичних процесів в умовах Індустрії 4.0. *Економіка та суспільство*, (34). URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/987> (дата звернення: 04.12.2025).

25. Yli-Huumo, J., et al. (2016). Where Is Current Research on Blockchain Technology? A Systematic Review. *PLOS ONE*. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0163477> (дата

звернення: 05.12.2025).

26. Методичні вказівки щодо розробки та оформлення кваліфікаційної роботи другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Інформаційні управляючі системи та технології» спеціальності 122 Комп'ютерні науки / Упоряд.: К.Е. Петров, В.М. Левикін, С.Ф. Чалий, М.В. Євланов, В.І. Саєнко, Д.К. Міхнов, А.В. Міхнова, О.В. Чала. ХНУРЕ: Харків, 2024. 24 с.

27. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Чинний від 2017-07-01. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.

28. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 2016-07-01. – Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.