

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
УКРАЇНИ

Факультет інформаційних технологій

ПОГОДЖЕНО
Декан факультету
інформаційних технологій
Ігор БОЛБОТ

(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
В.о. завідувача кафедри
економічної кібернетики
Наталія РОГОЗА

(підпис)
« _____ » _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Моделювання систем управління запасами з
використанням технологій блокчейн»**

Спеціальність 051 «Економіка»

Освітня програма - «Економічна кібернетика»

Орієнтація освітньої програми - освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

к.е.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Людмила ГАЛАСВА

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

д.е.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Володимир КРАВЧЕНКО

Виконав

(підпис)

Дмитро БАБИЧ

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет інформаційних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
економічної кібернетики

к.е.н., доцент _____ Наталія РОГОЗА

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

“ ____ ” ____ 2024 року

ЗАВДАННЯ

**ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ
РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Бабичу Дмитру Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 051 «Економіка»

Освітня програма - «Економічна кібернетика»

Орієнтація освітньої програми - освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи «Моделювання систем управління запасами з використанням технологій блокчейн»

затверджена наказом ректора НУБіП України від «01» 11.2024 р. № 1967 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи _____

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Дослідити теоретико-методологічні засади управління запасами в умовах цифровізації та визначити роль технології блокчейн у зниженні логістичних ризиків.
2. Проаналізувати світовий досвід та економічні передумови впровадження блокчейн-рішень у ланцюгах постачання.
3. Розробити стохастичну модель управління запасами з використанням смарт-контрактів та здійснити оцінку її економічної ефективності.

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _

Дата видачі завдання «04» 11. 2024р.

Керівник магістерської

кваліфікаційної роботи, д.е.н., доцент _____ Володимир КРАВЧЕНКО
(науковий ступінь, вчене звання) (підпис)

Завдання прийняв до виконання _____ Дмитро БАБИЧ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Тема: «Моделювання та перспективи застосування блокчейну у системах управління запасами»

Магістерська кваліфікаційна робота: 90 с., 7 табл., 13 рис., 48 джерел.

Об'єктом дослідження є процеси управління запасами в ланцюгах постачання, що функціонують в умовах інформаційної невизначеності та цифрової трансформації.

Предметом дослідження є моделі, методи та інструменти оптимізації товарних запасів із використанням технології блокчейн та смарт-контрактів.

Метою роботи є розробка та імітаційне моделювання стохастичної системи управління запасами, яка дозволяє мінімізувати логістичні витрати та ризики дефіциту шляхом зниження ентропії в ланцюгах постачання.

Методи дослідження. У роботі використано: системний аналіз (для дослідження логістичних процесів), теорію ймовірностей та математичну статистику (для аналізу попиту), методи стохастичної оптимізації (модель (Q, R)), імітаційне моделювання (метод Монте-Карло) та методи інвестиційного аналізу (NPV, ROI).

Результати дослідження. Розроблено економіко-математичну модель, яка враховує вплив блокчейн-технологій на параметри системи управління запасами (зниження транзакційних витрат та варіативності часу поставок). За результатами імітаційного моделювання доведено, що впровадження запропонованої моделі дозволяє зменшити рівень страхових запасів на 54%, знизити сукупні операційні витрати на 26,5% та зменшити ймовірність дефіциту до 1,2%. Проведено оцінку економічної ефективності проекту: розраховано чисту приведену вартість (NPV), яка склала 2,16 млн грн, та термін окупності - 1,2 роки.

Ключові слова: блокчейн, управління запасами, смарт-контракти, імітаційне моделювання, метод монте-карло, еоq, оптимізація.

АНОТАЦІЯ

Бабич Д.А - Моделювання та перспективи застосування блокчейну у системах управління запасами. - Магістерська робота.

Магістерська робота на здобуття наукового ступеня магістра за спеціалізацією - «Економічна кібернетика» - Національний університет біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України, 2024.

У магістерській роботі висвітлено теоретичні основи застосування технології блокчейн у системах управління запасами, зокрема, її здатність забезпечувати прозорість, безпеку та незмінність даних в ланцюгах поставок. Досліджено можливості блокчейну для вдосконалення відстеження товарів, прогнозування попиту та зниження витрат, пов'язаних з управлінням запасами, а також автоматизації процесів за допомогою смарт-контрактів. Проведена оцінка сучасного стану впровадження блокчейн-технологій у різних галузях, що використовують системи управління запасами, зокрема логістику, виробництво та роздрібну торгівлю. Проаналізовано актуальні проблеми інтеграції блокчейну, такі як складність впровадження та сумісність з існуючими системами. Запропоновано модель інтеграції блокчейн-технологій у системи управління запасами з урахуванням специфіки різних галузей, що дозволить покращити управління ланцюгами поставок, мінімізувати ризики та підвищити ефективність роботи підприємств.

Ключові слова: блокчейн, управління запасами, ланцюги поставок, прозорість, безпека даних, смарт-контракти

SUMMARY

The master's thesis covers the theoretical foundations of blockchain technology application in inventory management systems, particularly its ability to ensure transparency, security, and immutability of data in supply chains. The research explores blockchain's

potential to improve product tracking, demand forecasting, and cost reduction associated with inventory management, as well as process automation through smart contracts. An assessment of the current state of blockchain implementation in various industries utilizing inventory management systems, including logistics, manufacturing, and retail, has been conducted. Current challenges of blockchain integration, such as implementation complexity and compatibility with existing systems, are analyzed. A model for integrating blockchain technology into inventory management systems is proposed, taking into account the specifics of different industries. This model aims to enhance supply chain management, minimize risks, and improve the operational efficiency of enterprises.

Keywords: blockchain, inventory management, supply chains, transparency, data security, smart contracts

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ	11
1.1. Економічна сутність та принципи роботи блокчейну	11
1.2. Класичні та сучасні моделі управління запасами	19
1.3. Блокчейн як інструмент підвищення прозорості та контролю запасів	26
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ В ЛАНЦЮГАХ ПОСТАЧАННЯ	37
2.1 Світові тенденції цифровізації управління запасами	37
2.2 Економічні переваги та ризики блокчейн-рішень	44
2.3 Практичні кейси використання блокчейну в управлінні запасами	52
Висновки до розділу 2	59
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОКЧЕЙН-МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ	62
3.1 Постановка задачі та система економічних показників	62
3.2 Імітаційне моделювання сценаріїв управління запасами та оптимізація параметрів	69
3.3 Інвестиційний аналіз ефективності проекту та оцінка стратегічних перспектив впровадження	77
Висновки до розділу 3	83
ВИСНОВКИ	85
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	88

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасних умовах цифрової трансформації економіки підприємства шукають нові інструменти для підвищення ефективності бізнес-процесів. Управління запасами є ключовим аспектом діяльності компаній у сферах виробництва, торгівлі та логістики. Від того, наскільки добре налагоджено контроль запасів, залежить безперебійність постачання, оптимальність витрат і рівень задоволення попиту споживачів. Традиційно підприємства стикаються з проблемами надлишкових запасів, що «заморожують» обіговий капітал, або нестачі товарів, що призводить до втрати продажів і лояльності клієнтів. Пандемія COVID-19 та геополітичні виклики останніх років наочно продемонстрували вразливість глобальних ланцюгів постачання та актуалізували потребу в нових підходах до моніторингу й координації запасів. На цьому тлі технологія блокчейн привертає увагу як перспективний інструмент забезпечення прозорості, довіри та безпеки даних у системах управління запасами. Блокчейн дозволяє фіксувати кожну транзакцію руху товарів у розподіленому реєстрі, що унеможливорює несанкціоноване коригування інформації та сприяє довірі між учасниками ланцюга постачання. Для України, яка активно впроваджує цифрові технології та інтегрується у світові економічні процеси, дослідження можливостей застосування блокчейну в управлінні запасами є своєчасним і важливим. Це відповідає пріоритетам освітньої програми «Економічна кібернетика», де поєднуються економіко-математичні моделі та інформаційні технології.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є моделювання процесів управління запасами із використанням блокчейн-технологій та оцінка перспектив їх застосування для підвищення ефективності підприємств. Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання: 1) дослідити економічну сутність блокчейну та принципи його роботи, а також класичні моделі управління запасами в межах економічної кібернетики; 2)

проаналізувати світові тенденції цифровізації управління запасами, економічні переваги та ризики впровадження блокчейн-рішень, а також вивчити практичні кейси використання блокчейну в ланцюгах постачання; 3) розробити економіко-математичну модель управління запасами на основі блокчейну та смарт-контрактів, провести оцінку ефективності запропонованої моделі на прикладі умовної української компанії, визначити економічний ефект і перспективи впровадження таких рішень у практику.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є системи управління запасами підприємств у ланцюгах постачання, що функціонують у сучасному цифровому середовищі.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є моделі та методичні підходи до застосування технології блокчейн для підвищення прозорості й ефективності процесів управління матеріальними запасами.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених завдань використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Застосовано методи аналізу і синтезу при вивченні літературних джерел з економічної кібернетики, логістики та технології блокчейн; системний підхід - для розгляду процесів управління запасами як частини єдиного ланцюга постачання; економіко-математичне моделювання - при розробці оптимізаційної моделі (зокрема, із використанням формул економічно обґрунтованого розміру замовлення EOQ); методи порівняльного та графічного аналізу - для оцінки переваг, ризиків і результатів впровадження блокчейн-рішення; кейс-стаді (аналіз конкретного випадку) - для дослідження прикладу застосування блокчейну на підприємстві.

Отримані результати та їх новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці та обґрунтуванні економіко-математичного інструментарію для підвищення ефективності управління запасами в умовах цифровізації. Зокрема, вперше розроблено стохастичну модель управління запасами в середовищі блокчейн, яка, на відміну від існуючих підходів,

враховує вплив технології розподіленого реєстру на зниження інформаційної ентропії в ланцюгах постачання. Ключовою особливістю запропонованої моделі є введення функціональної залежності між використанням смарт-контрактів та зменшенням стандартного відхилення часу виконання замовлення і транзакційних витрат, що дозволяє розраховувати оптимальні параметри стратегії управління запасами з вищою точністю.

Удосконалено методичний підхід до імітаційного моделювання логістичних процесів, який базується на порівняльному аналізі традиційного та інноваційного сценаріїв функціонування підприємства методом Монте-Карло. Це дозволило кількісно оцінити вплив прозорості даних на згладжування динаміки запасів та довести можливість переходу до стратегії «Just-in-Time» зі зменшенням страхового запасу на 54% без втрати цільового рівня сервісу.

Набули подальшого розвитку теоретичні засади оцінки інвестиційної ефективності IT-проектів у логістиці, зокрема в частині інтеграції показників операційної ефективності, таких як оборотність запасів та рівень дефіциту, з фінансовими показниками. У роботі обґрунтовано, що основний економічний ефект від впровадження блокчейну досягається не лише за рахунок автоматизації документообігу, а передусім завдяки вивільненню оборотного капіталу через зниження ризиків невизначеності в ланцюгах постачання.

Структура та обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 90 сторінок друкованого тексту, у тому числі 7 таблиць та 13 рисунків. Список використаних джерел містить 48 найменувань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМ В УПРАВЛІННІ ЗАПАСАМИ

1.1. Економічна сутність та принципи роботи блокчейну

Сучасна економіка дедалі більше спирається на дані: хто, кому і що відвантажив, у якій кількості, за якою ціною, з якої партії, у який день і навіть годину. В управлінні запасами це відчувається особливо гостро. Невелика помилка в обліку, затримка оновлення інформації чи неточність у документах можуть призвести до дефіциту товару на складі, до зайвих витрат на зберігання або навіть до зриву поставок для ключових клієнтів. На цьому фоні блокчейн почали розглядати як інструмент, що дозволяє по-новому організувати зберігання та обмін даними між учасниками ланцюга постачання, зменшуючи рівень недовіри та операційні витрати.

У найпростішому розумінні блокчейн - це розподілений цифровий реєстр, де інформація про операції записується у вигляді послідовних блоків, пов'язаних між собою за допомогою криптографії. Кожен новий блок містить посилання на попередній (хеш), часову мітку та набір транзакцій. У результаті формується "ланцюг блоків", у якому дуже складно щось змінити заднім числом, не залишивши слідів. Економічна сутність блокчейну полягає в тому, що це не просто "ще одна база даних". Його часто називають інфраструктурою довіри або протоколом обміну цінністю. Ідея в тому, що кілька незалежних учасників - наприклад, виробник, логістичний оператор, дистриб'ютор і роздрібна мережа - можуть працювати з єдиним джерелом правди, не передаючи повний контроль над інформацією жодній окремій стороні.

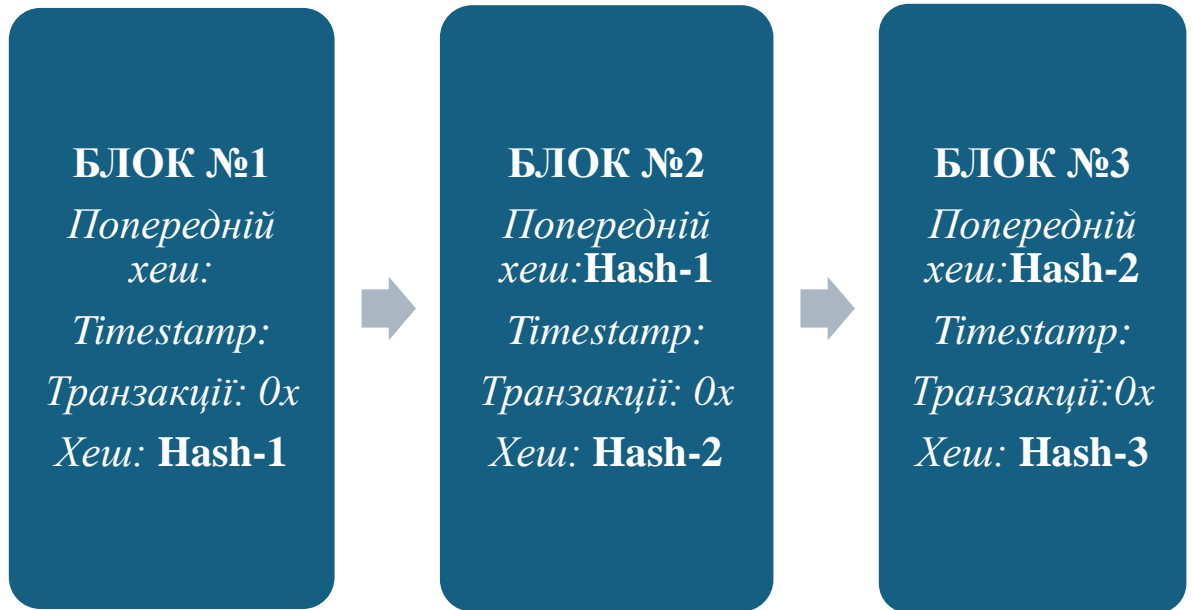


Рис. 1.1. Структура та взаємозв'язок блоків у розподіленому реєстрі.

Якщо пояснити “по-людськи”, блокчейн дає можливість зафіксувати факт певної господарської події (наприклад, відвантаження партії товару зі складу постачальника) в такому реєстрі, до якого мають доступ усі зацікавлені сторони. Завдяки криптографії та механізмам узгодження (консенсусу) цей запис неможливо непомітно змінити. Для економіки це означає зниження транзакційних витрат: менше часу та грошей витрачається на перевірку контрагентів, звірку документів, підтвердження виконання договорів. Також зменшується інформаційна асиметрія - ситуація, коли одна сторона знає значно більше, ніж інша, і може цим скористатися. У сфері управління запасами це особливо помітно. Кожен “зайвий” посередник, кожна ручна перевірка накладної, кожне окреме введення даних у свою систему - усе це не лише витрати, а й потенційні помилки. Блокчейн дозволяє будувати модель, де інформація про запаси, поставки та переміщення товару оновлюється в рамках спільного реєстру, а не зберігається ізольовано в базах даних окремих компаній.

Передумови появи блокчейну з'явилися ще задовго до криптовалют. У 1980-1990-х роках криптографи вже пропонували використовувати ланцюги

цифрових підписів і хеш-функцій для захисту електронних документів від підробки. Проте тоді ці ідеї залишалися радше академічними. Ситуація кардинально змінилася у 2008 році, коли з'явилася концепція біткойна, опублікована під псевдонімом Сатоші Накамото. У цій роботі було запропоновано децентралізовану цифрову валюту, де всі транзакції зберігаються в публічному реєстрі - блокчейні. У 2009 році мережа Bitcoin запрацювала на практиці, і саме вона показала, що розподілений реєстр може функціонувати без єдиного центру та центрального адміністратора. Пізніше з'явилися блокчейн-платформи другого покоління, такі як Ethereum. Їхня особливість у тому, що вони дозволяють не лише фіксувати транзакції, а й "програмувати" логіку взаємодії між учасниками за допомогою смарт-контрактів. Саме з цим пов'язаний перехід від сприйняття блокчейну як технології виключно для криптовалют до розуміння його як універсальної інфраструктури для фінансів, логістики, страхування, управління ланцюгами постачання та запасами.

Щоб зрозуміти, чому блокчейн може бути корисним саме в управлінні запасами, варто розглянути кілька його базових характеристик.

По-перше, це децентралізований характер. Інформація не зберігається на одному сервері, який належить одній компанії, а розподіляється між багатьма учасниками мережі. Кожен із них має копію реєстру, а зміни вносяться за узгодженими правилами. Завдяки цьому зменшується ризик збоїв, пов'язаних із відмовою центральної системи, та ускладнюється несанкціоноване втручання в дані.

По-друге, важлива незмінність записів. Блокчейн побудований так, що кожен новий блок містить хеш попереднього. Якщо хтось захоче змінити інформацію в уже підтвердженому блоку, зміниться й його "відбиток", а це порушить цілісність усього ланцюга. Щоб така зміна була прийнята, її мають фактично схвалити інші учасники - на практиці це дуже складно і дорого. Саме тому блокчейн часто називають реєстром "тільки для додавання", де історія подій не переписується щоразу "з нуля".

По-третє, це прозорість і простежуваність. У відкритих (публічних) блокчейнах історію транзакцій може переглянути будь-хто. У приватних та консорціумних - принаймні всі учасники, які мають доступ. Це створює можливість відслідковувати шлях конкретного активу: від моменту його появи і до поточного стану. У випадку з товарами це означає, що можна відтворити весь маршрут: виробництво, пакування, транспортування, прибуття на склад, переміщення між складами, відвантаження роздрібній мережі.

Окремо варто згадати криптографічний захист. Доступ до активів і підтвердження транзакцій здійснюється за допомогою пари ключів - відкритого й закритого. Відкритий ключ можна порівняти з номером рахунку, а закритий - з паролем або підписом. Така схема дозволяє чітко ідентифікувати власника активу й унеможливити несанкціоноване використання без знання закритого ключа.

І ще одна важлива риса - можливість програмувати бізнес-логіку через смарт-контракти. Наприклад, у системі управління запасами можна записати у смарт-контракті правило: якщо рівень запасів певної позиції падає нижче встановленого порогу, автоматично формується замовлення постачальнику. Усе це фіксується в блокчейні й може бути перевірене будь-яким учасником.

З економічної точки зору сукупність цих характеристик дає змогу скоротити витрати на перевірку достовірності інформації, прискорити узгодження між компаніями та зменшити кількість конфліктів, коли сторони оперують різними версіями одних і тих самих даних.

Попри технічну складність, основна логіка роботи блокчейну досить послідовна. Спочатку виникає певна подія, яку необхідно зафіксувати: переказ коштів, переміщення товару зі складу на транспорт, зміна власника партії тощо. Ця подія описується як транзакція. У ній зазначаються основні параметри: від кого і кому відбувається передача, що саме передається, в якій кількості, коли, за яких умов. Далі ця транзакція надсилається в мережу, де перевіряється на коректність: чи дійсний підпис, чи достатньо активів у відправника, чи не порушує операція встановлених правил. Транзакції не

записуються поодиноці - їх об'єднують у блок. Коли блоку вже достатньо даних, для нього обчислюється криптографічний хеш, який стає "ідентифікатором" цього блоку. Щоб новий блок став частиною офіційної історії, учасники мають дійти згоди, тобто досягти консенсусу. Для цього використовуються спеціальні алгоритми. Найвідоміший із них - Proof of Work, де вузли-майнери розв'язують складну математичну задачу. Хто першим знаходить правильне рішення, той пропонує блок для додавання до ланцюга й отримує винагороду. Інший підхід - Proof of Stake, де право пропонувати блоки мають вузли, які "заморозили" певну кількість монет у мережі. Такий механізм споживає менше енергії і краще підходить для корпоративних рішень.

Існують і інші алгоритми, які частіше використовують у приватних або консорціумних блокчейнах. Там учасники заздалегідь відомі, тому немає потреби у складних й енергозатратних механізмах захисту від анонімних зловмисників. Натомість робиться акцент на швидкості, передбачуваності й керованості процесу.

Таблиця 1.2. Порівняльна характеристика механізмів консенсусу в контексті управління запасами

Характеристика	Proof of Work (напр. Bitcoin)	Proof of Authority / Stake (Корпоративний)
Енергоспоживання	Критично високе (майнінг)	Низьке (екологічне)
Швидкість (TPS)	Низька (7-15 транзакцій/сек)	Висока (1000+ транзакцій/сек)
Вартість транзакції	Висока та волатильна	Низька та прогнозована
Доступ до мережі	Публічний (Public)	Дозволений (Permissioned)
Ідентифікація учасників	Псевдоанонімна	Повна верифікація (KYC)
Придатність для логістики	Низька	Висока

Після того як консенсус досягнуто, новий блок розповсюджується між усіма вузлами мережі. Кожен учасник додає його до своєї копії реєстру. З цього моменту дані, що містяться в блоці, вважаються офіційно зафіксованими. Щоб підтримувати чесну поведінку, у блокчейн-протокол закладають економічні стимули: за правильну роботу - винагорода, за спроби шахрайства - втрата ресурсів або виключення з мережі.

На практиці блокчейни можуть суттєво відрізнятись за рівнем відкритості та тим, хто контролює доступ до них. Найвідоміші - публічні мережі, на кшталт Bitcoin або Ethereum, де приєднатися може будь-хто, а реєстр доступний для перегляду всім. Вони максимально децентралізовані, проте мають обмеження за швидкістю та вартістю транзакцій. Поряд із ними існують приватні блокчейни, де доступ до мережі контролює одна організація. Такі рішення часто впроваджують у межах великої корпорації, коли потрібно забезпечити незмінність і простежуваність внутрішніх даних, але немає сенсу створювати відкриту для всього світу мережу. Окрему нішу займають консорціумні блокчейни. У цьому випадку мережу спільно контролює група організацій. Наприклад, кілька виробників, логістичні компанії та банки можуть об'єднатися, щоб вести спільний реєстр руху товарів і супровідних фінансових операцій. Жоден із них не домінує над іншими, але всі мають доступ до погодженої, узгодженої версії даних. Можливий і гібридний підхід, коли частина інформації залишається публічною, а частина закритою для зовнішнього світу і доступна лише учасникам певного кола. Це дозволяє поєднувати переваги відкритих мереж (наприклад, інтеграцію з іншими сервісами) із вимогами до конфіденційності бізнес-даних.

Для управління запасами найчастіше розглядають саме приватні та консорціумні блокчейни. У такому форматі учасники ланцюга постачання залишаються власниками своїх даних, але погоджуються вести частину інформації у спільному реєстрі. Це дає економічну вигоду у вигляді зменшення витрат на звірку даних, аудит та претензійну роботу.

Запровадження блокчейну в системи управління запасами має кілька ключових наслідків. Насамперед зростає прозорість і простежуваність. Кожна операція з товаром - його виробництво, пакування, передача перевізнику, прибуття на проміжний склад, рух у дорозі, прихід на склад дистриб'ютора чи до торгової точки - може фіксуватися в реєстрі. У разі виникнення проблем, наприклад, із якістю або термінами придатності, компанія може швидко визначити, де саме стався збій, яку партію потрібно відкликати і кого повідомити.

Другий важливий ефект - зниження адміністративних і транзакційних витрат. У традиційній моделі кожна компанія веде свій облік, а обмін інформацією часто здійснюється через електронну пошту, Excel-файли або паперові документи. Це означає постійну звірку залишків, ручне перенесення даних, подвійні або навіть потрійні введення. Спільний блокчейн-реєстр дозволяє зробити так, що одна операція одразу відображається у всіх учасників, які до неї причетні. Таким чином, кількість узгоджень, коригувань і суперечок суттєво скорочується.

Третій аспект - оптимізація рівня запасів. Коли всі ключові партнери в ланцюгу постачання бачать більш-менш повну картину: скільки товару вже відвантажено, що зараз у дорозі, що планується до виробництва, - легше уникати як дефіциту, так і надлишкових запасів. Підприємства можуть коригувати свої замовлення, спираючись не на "приблизні" оцінки, а на дані, яким довіряють усі.

Четвертий ефект пов'язаний зі зниженням ризиків. У умовах непрозорих ланцюгів постачання компанії змушені закладати в ціни ризики шахрайства, псування, прихованих змін постачальників тощо. Прозорий реєстр, де можна відслідкувати походження товару, зменшує ці ризики. Для банків і страхових компаній це теж важливий сигнал: якщо історія руху товару підтверджена блокчейном, вони можуть запропонувати м'якші умови кредитування чи страхування.

Нарешті, блокчейн відкриває можливість нових моделей фінансування запасів. За допомогою токенизації товарних залишків їх можна представити у вигляді цифрових активів, які використовуються як застава чи продаються в рамках партнерських програм. Це створює додаткову гнучкість в управлінні обіговими коштами, особливо для компаній, які мають значні запаси на складах, але обмежені в доступі до традиційних джерел фінансування.

Разом із перевагами блокчейн має й низку обмежень, про які варто пам'ятати, щоб не переоцінити його можливості.

Одна з найбільш очевидних проблем - масштабованість і продуктивність, особливо для публічних мереж. Якщо система управління запасами генерує тисячі операцій щосекунди, далеко не кожен блокчейн здатен обробити такий обсяг у режимі "майже реального часу". Приватні й консорціумні рішення частково пом'якшують цю проблему, проте вимагають ретельного проектування інфраструктури.

Другою важливою групою є витрати на впровадження та інтеграцію. Щоб блокчейн дійсно працював, його потрібно "зв'язати" з наявними інформаційними системами - ERP, WMS, TMS, CRM тощо. Потрібні інвестиції у програмне забезпечення, навчання співробітників, зміну бізнес-процесів. Результат не завжди з'являється миттєво: іноді потрібен час, щоб система "відбилася" економічно.

Не можна ігнорувати й правові аспекти. У багатьох країнах статус записів у блокчейні, смарт-контрактів та токенів ще до кінця не визначений законодавством. Для підприємства це означає, що записи в блокчейні можуть не завжди визнаватися достатнім доказом у суді або потребуватимуть додаткового підтвердження. Також виникають питання, як саме відобразити такі операції в бухгалтерському та податковому обліку.

Окремо стоять питання кібербезпеки. Хоча сам блокчейн як структура дуже стійкий до підробки, слабкою ланкою залишаються гаманці, сервіси зберігання приватних ключів, інтеграційні шлюзи між різними системами. Втрата приватного ключа фактично означає втрату доступу до активу. Тому

впровадження блокчейну неможливо розглядати окремо від побудови надійної системи захисту інформації.

І нарешті, навіть найкраща технологія нічого не дасть без готовності людей її використовувати. Часто головним бар'єром стає не техніка, а організаційний опір: небажання ділитися даними з партнерами, страх втратити контроль над інформацією, інерція старих процесів. Якщо учасники ланцюга постачання не довіряють один одному настільки, щоб погодитися на спільний реєстр, ефект від блокчейну буде суттєво нижчим за потенційний.

1.2. Класичні та сучасні моделі управління запасами

Управління запасами - це один із тих блоків системи управління підприємством, який ніби «не помічають», доки все працює нормально. Але варто лише на кілька днів затриматися з поставкою сировини чи «переборщити» з обсягом замовлення, як одразу з'являються дуже відчутні витрати: простій виробництва, втрата клієнтів, заморожені гроші на складі, псування продукції. Саме тому в економіці давно склалася окрема теорія управління запасами, яка пропонує різні моделі - від простих аналітичних формул до складних стохастичних підходів і сучасних концепцій «бережливого» управління.

У цьому підпункті логічно послідовно пройти шлях від класичних моделей, які закладають базу для розуміння, до сучасних підходів, що враховують невизначеність попиту, швидкі зміни ринку й цифровізацію ланцюгів постачання.

Запаси в компанії можуть мати дуже різний вигляд: сировина і матеріали, незавершене виробництво, готова продукція, запчастини, витратні матеріали тощо. З одного боку, вони захищають підприємство від перебоїв у поставках і коливань попиту, з іншого - завжди пов'язані з витратами. Потрібні складські приміщення, персонал, системи обліку, а ще є ризики псування, морального старіння продукції, крадіжок, замороження обігових коштів.

Задача управління запасами по суті зводиться до пошуку балансу між двома протилежними крайнощами: не тримати надто багато (щоб не переплачувати за зберігання) і водночас не допустити дефіциту (щоб не втратити продажі й репутацію). Саме це протиріччя й намагаються формалізувати різні моделі управління запасами. Вони зазвичай мінімізують сумарні витрати, у які входять витрати на розміщення замовлень, витрати на зберігання, можливі штрафи або втрати від дефіциту та іноді - витрати на запуск виробництва.

Початком класичної теорії запасів вважають модель економічного розміру замовлення (EOQ, або модель Вільсона). Вона описує «ідеалізовану» ситуацію, коли:

- попит стабільний і відомий заздалегідь;
- замовлення приходить миттєво, без затримок;
- дефіцит не допускається;
- ціна одиниці товару не залежить від розміру партії.

Ідея моделі проста й інтуїтивно зрозуміла. Якщо замовляти часто й маленькими партіями, підприємство матиме невеликі середні запаси, але постійно витрачатиметься на оформлення замовлень і доставку. Якщо замовляти рідко, але великими партіями - витрат на замовлення буде менше, зате більшу частину часу на складі лежатиме значний запас, який треба зберігати, охороняти, страхувати.

Десь посередині між цими двома крайнощами існує оптимальний розмір замовлення, за якого сумарні витрати за певний період (наприклад, за рік) будуть мінімальними. Цей розмір і дає класична формула EOQ:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}},$$

де

- D - попит за період (наприклад, за рік),
- S - витрати на розміщення одного замовлення (доставка, оформлення, погодження тощо),

- H - витрати на зберігання одиниці товару за той самий період.

Ця формула відображає логіку компромісу: чим більший попит і чим дорожче розмістити замовлення, тим вигідніше замовляти більші партії; чим дорожче зберігати товар, тим вигідніше зменшувати розмір партії.

Відповідний оптимальний інтервал між послідовними замовленнями можна визначити як відношення оптимального розміру замовлення до річного попиту:

$$T^* = \frac{Q^*}{D}$$

Таким чином, знаючи оптимальний розмір замовлення та прогнозований попит за період, підприємство може розрахувати орієнтовну частоту поповнення запасів.

На основі базової моделі побудовано багато модифікацій. Наприклад:

- модель із поетапним поповненням запасів, коли товар не «падає» на склад миттєво, а надходить поступово, паралельно з продажами чи виробництвом;
- модель із дозволеним дефіцитом, коли частина попиту може тимчасово не задовольнятися одразу, але компенсується пізніше, якщо такий варіант економічно вигідніший, ніж постійно тримати дуже високий запас;
- моделі з обмеженнями місткості складу, виробничих потужностей, фінансовими лімітами на закупівлі тощо.

Попри свою простоту, EOQ і її варіації досі використовуються в практиці. Їхня перевага - прозорість та можливість швидко оцінити порядок величин оптимальних параметрів. Недолік - занадто жорсткі припущення щодо сталості попиту й часів поставки, що рідко відповідає реальності.

У реальному житті попит рідко буває рівним і передбачуваним, як у класичній моделі. Той самий товар може продаватися по-різному залежно від дня тижня, місяця, сезону, рекламних кампаній, активності конкурентів. Навіть якщо середній попит відносно стабільний, його щоденне чи щотижневе значення

коливається. До цього додаються затримки в поставках, логістичні збої, форс-мажори.

У таких умовах детерміновані моделі дають «гарну математику для ідеального світу», але цього замало. Тому почали розвиватися стохастичні моделі, у яких попит, час поставки або обидві величини розглядаються як випадкові.

Однією з найпоширеніших є політика неперервного перегляду (Q, R). Її суть полягає в тому, що для кожної позиції встановлюються два параметри:

- Q - розмір партії замовлення (часто близький до EOQ, але скоригований з урахуванням невизначеності);
- R - точка замовлення (рівень запасу, при досягненні якого потрібно оформити нове замовлення).

Система постійно «дивиться» на поточний рівень запасу з урахуванням уже оформлених, але ще не отриманих замовлень. Коли цей рівень падає до R, автоматично створюється замовлення на Q одиниць. До моменту, коли замовлення прийде, запас має не встигнути впасти до нуля - для цього вводиться страховий запас.

Таблиця 1.1 Порівняння традиційної системи та блокчейн-моделі управління запасами

Критерій / показник	Традиційна система	Блокчейн-модель
Прозорість руху запасів	Дані розрізнені між учасниками, можливі розбіжності	Єдиний узгоджений реєстр подій для всіх учасників
Швидкість простежуваності	Від годин до днів	Практично в режимі, наближеному до реального часу
Транзакційні витрати (звірки, погодження)	Високі, значний обсяг ручної роботи	Знижені завдяки смарт-контрактам та єдиному реєстру
Рівень страхових запасів	Підвищений через невизначеність та недовіру	Можливе зниження за рахунок більшої визначеності

Ризик помилок і шахрайства	Вищий, можливий маніпуляції документами	Складно змінити записи заднім числом, краща трасованість
Витрати на IT-інфраструктуру	Переважно локальні ERP/WMS	ERP/WMS + блокчейн-платформа консорціумного типу

Розрахунок R зазвичай складається з двох компонентів: прогнозованого попиту за час поставки та запасу безпеки, що залежить від варіативності попиту й допустимого ризику дефіциту. Чим більша невизначеність і чим суворіші вимоги до рівня сервісу (наприклад, «дефіцит не допускається у 99 % випадків»), тим більшим має бути страховий запас.

Стохастичні моделі можуть бути дуже різними: від відносно простих, де попит вважається нормально розподіленим, до складних, які враховують сезонність, промо-акції, залежність між різними товарами. У сучасних умовах їх часто поєднують із методами прогнозування, системами машинного навчання й ERP-платформами, які автоматично переглядають параметри Q та R у міру накопичення нових даних.

На реальному підприємстві номенклатура може налічувати сотні чи тисячі позицій. Очевидно, що керувати запасами кожної з них «з однаковим рівнем уваги» - неефективно. Десь важливий кожен день простою, десь запас може місяцями стояти на полиці без суттєвих наслідків.

Щоб правильно розподіляти увагу й ресурси, використовують різні методи класифікації запасів. Найвідоміший серед них - ABC-аналіз. Він спирається на принцип Парето: невелика частина позицій дає основну частку обороту або маржі. Зазвичай виділяють:

- групу А - відносно небагато позицій, але з високою часткою в обороті чи прибутку;
- групу В - проміжні товари;
- групу С - численні позиції з невеликою індивідуальною значущістю.

Для кожної групи застосовують різні стратегії управління. Наприклад, для товарів класу А використовують точніші прогнози та стохастичні моделі,

частіше переглядають параметри замовлення, контролюють постачання майже в режимі реального часу. Для групи С, навпаки, достатньо простих норм запасу та періодичної перевірки, оскільки детальна оптимізація для кожної дрібної позиції не окупається.

Крім ABC, застосовують XYZ-аналіз (класифікація за стабільністю попиту: стабільний, помірно змінний, дуже змінний), а також комбіновані схеми ABC/XYZ, де кожен товар отримує дволітерний код (наприклад, AX - важливий із стабільним попитом, CY - малозначущий із змінним попитом тощо). Такі підходи дозволяють будувати диференційовані політики управління запасами й узгоджувати глибину контролю з реальним економічним ефектом від кожної позиції.

Із часом стало зрозуміло, що управління запасами - це не лише математичні формули, а частина загальної філософії організації виробництва й логістики. На цій основі сформувалися сучасні концепції, які роблять акцент на потоці, координації учасників ланцюга постачання та усуненні причин появи зайвих запасів.

Однією з ключових концепцій є Just-in-Time (JIT) - «точно вчасно». Її ідея - максимально скоротити запаси на всіх етапах, отримуючи матеріали й комплектуючі саме тоді, коли вони потрібні в виробництві або продажу. Запаси тут розглядаються як «зло, яке маскує проблеми»: нестабільний попит, збої в постачанні, неузгодженість підрозділів. Зменшуючи запаси, компанія ніби «оголює» ці проблеми й змушена їх вирішувати.

JIT вимагає дуже надійних постачальників, відпрацьованої логістики, якісних прогнозів попиту й розвиненої інформаційної системи. Будь-який серйозний збій може призвести до дефіциту й зупинки виробництва. Тому в «чистому вигляді» JIT трапляється не так часто, натомість багато компаній запозичують окремі його елементи, поєднуючи їх із більш традиційними підходами.

Тісно пов'язана з JIT філософія «бережливого виробництва» (lean). У ній запаси розглядаються як одна з форм втрат - так само, як зайві переміщення,

надлишкова обробка, очікування, перепродажн. Мета - будувати процеси так, щоб потреба в запасах природно зменшувалася: через вирівнювання завантаження, скорочення часу переналагодження обладнання, покращення якості прогнозів, співпрацю з постачальниками.

Для розподілених ланцюгів постачання велике значення мають концепції DRP (Distribution Requirements Planning) та сучасні системи планування матеріальних ресурсів (MRP, MRP II). Вони дозволяють планувати потребу в запасах не лише в одній точці, а в мережі складів і виробничих майданчиків, узгоджуючи випуск продукції, закупівлі й логістику.

Окремо варто згадати модель Vendor Managed Inventory (VMI) - «запаси, керовані постачальником». У цьому випадку частину функцій з управління запасами бере на себе постачальник: він отримує доступ до даних про продажі й залишки у клієнта та сам вирішує, коли і скільки відвантажити. Вигода для постачальника - стабільніший попит і краще завантаження виробництва; для клієнта - менше адміністративної роботи й нижчий ризик дефіциту. Але для VMI критичною є довіра та прозорий обмін даними.

За останні десятиліття моделі управління запасами дедалі тісніше інтегруються з інформаційними системами. Якщо раніше розрахунки вели на папері або в простих електронних таблицях, то зараз вони реалізуються у вигляді модулів ERP-систем, спеціалізованих WMS (складських систем), TMS (транспортних систем) і платформ для управління ланцюгами постачання.

Цифровізація змінює не лише інструменти розрахунку, а й саму природу даних. Завдяки штрихкодам, QR-кодам, RFID-міткам, онлайн-касовим апаратам, інтеграції з транспортними сервісами та інтернет-магазинами дані про переміщення товару й продажі надходять у системи майже в реальному часі. Це дозволяє використовувати більш гнучкі та адаптивні моделі, швидко реагувати на зміни попиту, перевіряти прогнози, автоматично коригувати параметри політик (Q, R), норм запасу й страхових резервів.

Проте залишається серйозний виклик - розподіленість і фрагментованість інформації. Кожен учасник ланцюга постачання - виробник, логістичний оператор, дистриб'ютор, роздрібна мережа - веде свій облік у своїй системі. Навіть якщо системи технічно інтегровані, питання довіри до даних, захищеності записів, можливості їх «заднім числом» змінити або приховати часто залишаються відкритими.

Саме тут з'являється інтерес до блокчейн-технологій. Вони пропонують не заміну класичним моделям управління запасами, а додатковий рівень - рівень спільного, незмінного реєстру подій ланцюга постачання. Класичні й сучасні моделі (EOQ, стохастичні політики, ABC/XYZ, JIT, VMI, DRP) можуть використовуватися як і раніше, але базуватися на даних, які фіксуються й узгоджуються між учасниками в блокчейн-системі.

Таким чином, класичні та сучасні моделі управління запасами створюють теоретичну й практичну основу для подальшого моделювання блокчейн-рішень.

1.3. Блокчейн як інструмент підвищення прозорості та контролю запасів

У попередніх підпунктах йшлося про те, як традиційні та сучасні моделі управління запасами допомагають шукати баланс між дефіцитом і надлишковими запасами. Але всі ці моделі працюють настільки добре, наскільки якісні дані вони отримують. Якщо дані про залишки, рух товарів, строки поставок або виконання контрактів неточні, несвоєчасні чи просто «підчищені», жодна навіть найкраща формула не дасть адекватного результату.

Саме тут на перший план виходять прозорість і контроль даних. Управління запасами в реальній мережі постачання - це не лише про «скільки замовити», а й про те, чи можна довіряти інформації від постачальника, перевізника, складу, дистриб'ютора, роздрібною мережі. Блокчейн пропонує новий підхід до цієї проблеми: він не змінює суті моделей управління

запасами, але радикально змінює спосіб фіксації й обміну даними між учасниками.

У класичній системі кожен учасник ланцюга постачання веде свій власний облік. Виробник має свою ERP-систему, логіст - транспортну систему, склад - WMS, ритейлер - власні програми для обліку продажів і залишків. Формально всі мають працювати з одними й тими ж даними, але на практиці виникають:

- розбіжності в записах (у постачальника - одні залишки, у клієнта - інші);
- затримки в оновленні інформації (фактична подія відбулася, але в системі з'явилася через день-два);
- людський фактор (помилки при введенні, дублікати, підміна документів);
- обмежена видимість (кожен бачить тільки свою "частинку" ланцюга).

Це призводить до того, що реальні запаси в системі та на папері (чи в базі) часто не збігаються. На рівні моделювання це проявляється як додаткові "шуми": попит виглядає більш нестабільним, ніж є насправді, строки поставок оцінюються неточно, а ефект «батога» (bullwhip effect), коли невеликі коливання попиту в роздробі перетворюються на великі хвилі замовлень вище по ланцюгу, тільки посилюється.

У такій ситуації компанії вимушені або тримати завищені страхові запаси, або миритися з частими дефіцитами. Обидва варіанти означають прямі втрати.

Блокчейн не замінює ERP, WMS чи інші внутрішні системи підприємства. Він додає до них ще один рівень - рівень спільного реєстру подій, доступного всім узгодженим учасникам. Ідея проста: ключові факти з життя товару (виробництво партії, відвантаження, перетин кордону, прихід на склад, інвентаризація, продаж, повернення) фіксуються у вигляді транзакцій у блокчейні.

Кожен запис має часову мітку, пов'язаний із конкретною партією або навіть одиницею товару, підписаний відповідальним учасником і потрапляє в незмінний ланцюг блоків. Це означає, що:

- неможливо “тихо” підчистити або підмінити історію без того, щоб це не помітили інші учасники;
- усі зацікавлені сторони бачать однакову версію подій (немає кількох “правд” у різних системах);
- є можливість відслідкувати шлях товару від джерела до кінцевого споживача.

Важливий нюанс: далеко не всі дані обов'язково зберігаються в блокчейні в “чистому вигляді”. Часто туди записують лише ключові атрибути й криптографічні “відбитки” документів, тоді як самі документи зберігаються в звичайних базах даних або в хмарних сховищах. Але навіть така схема вже істотно підвищує довіру до історії операцій: якщо хтось змінить документ поза блокчейном, його “відбиток” перестане збігатися з тим, що зафіксовано у спільному реєстрі.

Одним із найочевидніших ефектів від впровадження блокчейну є покращення простежуваності (traceability). Це означає, що компанія може швидко й достовірно відповісти на запитання:

- звідки взялася конкретна партія товару;
- які етапи ланцюга вона пройшла;
- у яких точках системи вона зараз знаходиться;
- кому саме ця партія була відвантажена.

У харчовій промисловості, наприклад, саме потреба в простежуваності стала одним із головних драйверів блокчейн-проектів. Пілоти з відстеження манго, свинини, молочних продуктів показали, що час на пошук джерела проблемної партії можна скоротити з днів і навіть тижнів до лічених секунд.

З погляду управління запасами це означає:

- точніше уявлення про те, де саме фізично знаходиться товар (не просто “в дорозі”, а на конкретному етапі маршруту);

- можливість локалізувати проблему (наприклад, відкликати не всі запаси на ринку, а лише партії з конкретною історією);
- краще планування поповнення складів з урахуванням реального становища вантажів.

Коли інформація про рух товарів потрапляє в блокчейн практично одночасно з фізичними операціями (через інтеграцію зі сканерами, RFID, IoT-сенсорами), моделі управління запасами отримують майже «живі» дані, а не запізнілі звіти. Це дозволяє зменшити потребу в надлишкових страхових запасах, не жертвуючи рівнем сервісу.

Ще одна суттєва перевага блокчейну - можливість використовувати смарт-контракти, тобто програми, які автоматично виконують заздалегідь визначені умови. У контексті управління запасами це відкриває кілька важливих сценаріїв.

По-перше, замовлення на поповнення запасів можуть формуватися автоматично не тільки на основі внутрішніх даних компанії, а й з урахуванням інформації з усього ланцюга постачання. Наприклад, смарт-контракт може бути налаштований так, що коли рівень запасу на складі ритейлера падає нижче певного порогу, а в блокчейні видно, що проміжний склад має достатній залишок, автоматично ініціюється переміщення товару або замовлення постачальнику.

По-друге, смарт-контракти можуть використовуватися для автоматичного розрахунку штрафів, бонусів, змін цін залежно від дотримання строків поставки, умов зберігання, температурного режиму тощо. Якщо IoT-сенсори фіксують, що при транспортуванні холодого товару була перевищена допустима температура, ця інформація потрапляє в блокчейн, і смарт-контракт автоматично коригує оплату або запускає процедуру реєстрації.

По-третє, смарт-контракти можуть допомагати при спільному управлінні запасами (VMI, спільні склади тощо). Умови, хто за що відповідає, коли і як поповнюються запаси, які межі мінімального та максимального

рівнів залишків є прийнятними, можуть бути зафіксовані в коді смарт-контракту. Це зменшує простір для суперечок і спрощує аудит: усі правила виконуються автоматично й прозоро.

З точки зору економіки, автоматизація таких процесів зменшує адміністративні витрати, скорочує час реакції на зміну ситуації, підвищує передбачуваність грошових потоків і дозволяє точніше пов'язувати рівень сервісу з реальними витратами.

Блокчейн сам по собі не є “системою управління запасами” в тому сенсі, як ERP чи WMS. Його роль - бути надійним шаром даних, на який спираються прикладні рішення. Типова архітектура виглядає так:

- на нижньому рівні - фізичний рух товару, який фіксується через сканування штрихкодів, RFID-мітки, дані датчиків, ручні операції персоналу;
- на середньому рівні - корпоративні системи (ERP, WMS, TMS), які обробляють ці події, розраховують залишки, формують документи та аналітику;
- на верхньому рівні - блокчейн, куди виносяться ключові факти та “відбитки” документів, які мають значення для кількох учасників одночасно.

Такий підхід дозволяє:

- не ламати існуючі процеси, а доповнювати їх новим рівнем довіри й контролю;
- забезпечити цілісність і синхронізацію даних між організаціями, які використовують різні внутрішні системи;
- спростити підключення нових учасників, яким достатньо інтегруватися з блокчейном, а не з десятками різних корпоративних систем.

ІоТ-пристрої (датчики температури, вологості, ударів, GPS-трекери) можуть автоматично фіксувати важливі параметри й записувати їх у блокчейн. Це особливо важливо для товарів із жорсткими умовами зберігання (фармацевтика, продукти харчування, високотехнологічна електроніка). Так

компанія отримує не просто інформацію “товар доставлено”, а повну історію умов, у яких він перебував, що напряду впливає на якість запасів і прийняття рішень щодо їх реалізації або списання.

Окрема проблема в управлінні запасами - так зване *inventory shrinkage*: різниця між тим, що має бути на складі за документами, і тим, що є фактично. Вона складається з крадіжок, списань, помилок обліку, несанкціонованого переміщення товару, підміни партій тощо. Для багатьох галузей це відчутні відсотки від обороту.

Блокчейн дозволяє зменшити ці втрати за рахунок:

- чіткої фіксації кожного переміщення товару з прив'язкою до відповідальної особи або підрозділу;
- неможливості “заднім числом” змінити історію так, щоб це не було помітно іншим учасникам;
- кращої інтеграції між фізичним і документальним обігом (дані зі сканерів та ваг одразу потрапляють у спільний реєстр).

Дослідження й пілотні проєкти показують, що прозорий блокчейн-реєстр у поєднанні з нормальними процедурами безпеки та інвентаризації дозволяє суттєво знизити ризики шахрайства, завищення або заниження залишків, маніпуляцій із партіями товару.

Для моделювання це важливо тим, що зменшується розрив між “моделлю” і реальністю: фактичні запаси ближчі до облікових, і системи управління можуть приймати рішення на більш надійній інформаційній базі.

Одна з головних причин неефективного управління запасами в довгих ланцюгах постачання - обмежений обмін інформацією. Кожен рівень бачить лише свій попит і свої поставки, але не знає, що відбувається “нижче” або “вище” по ланцюгу. Це й створює ефект «батога», коли невелике коливання попиту в роздробі призводить до сильно збільшених коливань замовлень у виробника.



Рис. 1.2. Ілюстрація ефекту «батога» в традиційних ланцюгах постачання.

Блокчейн у цьому сенсі може виступати як “єдине вікно” правдивих даних. Якщо учасники домовляються вносити в блокчейн ключові показники (обсяги продажів, залишки, відвантаження, плани поставок), кожен із них отримує можливість:

- бачити реальний попит “на кінці” ланцюга, а не лише замовлення свого безпосереднього контрагента;
- краще відрізнити короткострокові “шуми” від стабільних трендів;
- скорочувати “запас на всяк випадок”, тому що невизначеність менша.

У поєднанні з класичними моделями управління запасами й сучасними системами прогнозування блокчейн дозволяє будувати більш стабільні політики (Q, R), тонше налаштовувати страхові запаси, швидше реагувати на зміни реального попиту, а не лише на коливання замовлень.

Переваги від підвищення прозорості та контролю запасів через блокчейн розподіляються між усіма учасниками ланцюга, хоча для кожного вони можуть виглядати по-різному.

- Виробник отримує більш стабільний і передбачуваний попит, може краще планувати завантаження потужностей, зменшити потребу в надлишкових складах готової продукції, підвищити якість сервісу перед дистриб'юторами й ритейлерами.
- Логістичні компанії отримують чіткішу картину руху вантажів, можуть оптимізувати маршрути, скоротити «порожні» пробіги, зменшити ризики спорів щодо того, хто й коли відповідав за товар.
- Оптові компанії та дистриб'ютори мають кращу видимість і з боку виробника, і з боку роздрібною мережі, що дозволяє оптимізувати рівень запасів у проміжних ланках, уникати дублювання запасів і зменшувати ризик списань.
- Ритейлери отримують інструмент для оперативного відкликання проблемних партій, кращого планування акцій, зменшення дефіцитів на полицях і надлишкових залишків у “хвості” асортименту.

Для кінцевого споживача ці зміни проявляються менш очевидно, але теж відчутно: більш стабільна наявність товару, менша кількість викликів безпеки продукції, можливість просканувати код і побачити історію походження товару. У підсумку це впливає і на довіру до бренду, і на готовність платити за прозорий і якісний продукт.

Водночас блокчейн не є «чарівною паличкою», яка автоматично вирішує всі проблеми з прозорістю та контролем запасів. Реальні проекти показують низку серйозних викликів: технічних, організаційних, економічних.

По-перше, не всі дані однаково якісні. Блокчейн робить незмінною історію подій, але якщо на вході фіксується некоректна або сфальсифікована інформація, то отримаємо “вічно неправильні” дані. Тому потрібні процедури верифікації, автоматичні перевірки з боку датчиків і обладнання, розумний розподіл рівнів довіри до різних джерел.

По-друге, потрібна кооперація між учасниками. Блокчейн має сенс тільки тоді, коли в ньому бере участь достатньо велика частина ланцюга: виробники, логісти, склади, ритейлери, можливо, банки й страхові компанії. Це вимагає узгодження стандартів, форматів даних, правил доступу, моделей оплати інфраструктури.

По-третє, виникають питання масштабованості й продуктивності. Якщо фіксувати в блокчейні кожен дрібний рух одиниці товару в глобальному ланцюгу, навантаження на мережу буде дуже великим. Це вирішується за рахунок оптимізації рівня деталізації (наприклад, записувати не кожен пік сканера, а агреговані події), використання приватних і консорціумних блокчейнів та побудови гібридних архітектур.

По-четверте, є правові та регуляторні аспекти: як трактувати дані в блокчейні з точки зору доказової бази, захисту персональних і комерційних даних, відповідності нормам зберігання інформації. Законодавство в цій сфері лише формується, і бізнесу доводиться рухатися попереду нормативної бази або разом із нею.

Нарешті, економічна доцільність. Впровадження блокчейн-рішень потребує інвестицій у розробку, інтеграцію, навчання персоналу, залучення партнерів. У невеликих або простих ланцюгах, де проблем із прозорістю не так багато, запуск такої системи може не окупитися. Найбільший ефект блокчейн дає в складних, багатоланкових, міжнародних мережах постачання, де ставки високі, а питання довіри критичні.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні засади, без яких неможливо коректно моделювати блокчейн-системи в управлінні запасами. Насамперед проаналізовано економічну сутність блокчейну та принципи його роботи. Було показано, що блокчейн - це не просто новий формат бази даних, а інфраструктура довіри, яка дозволяє різним учасникам ланцюга постачання працювати з єдиним, незмінним і прозорим реєстром операцій. Завдяки

децентралізованому зберіганню даних, криптографічному захисту, механізмам консенсусу та смарт-контрактам технологія створює умови для суттєвого зниження транзакційних витрат, мінімізації інформаційної асиметрії та підвищення передбачуваності взаємодії між контрагентами.

Далі були розглянуті класичні та сучасні моделі управління запасами, які складають теоретичний каркас для будь-яких практичних рішень у цій сфері. Класичні детерміновані моделі, зокрема модель економічного розміру замовлення, дозволяють формалізувати компроміс між витратами на розміщення замовлень та витратами на зберігання. Стохастичні моделі й політики типу (Q, R) дають змогу враховувати невизначеність попиту та строків поставок, налаштовуючи страхові запаси відповідно до прийнятого рівня ризику дефіциту. Методи класифікації номенклатури (ABC, XYZ, комбіновані підходи) дозволяють диференціювати глибину контролю залежно від економічної значущості товарних позицій. Сучасні концепції, такі як Just-in-Time, бережливе виробництво, VMI, DRP, показують, що управління запасами сьогодні розглядається не ізольовано, а як частина інтегрованих виробничо-логістичних систем, тісно пов'язаних із цифровими платформами.

У підпункті 1.3 було обґрунтовано, що блокчейн органічно поєднується з уже відпрацьованими моделями управління запасами, не замінюючи їх, а підсилюючи їх ефективність. Завдяки фіксації ключових подій ланцюга постачання у спільному незмінному реєстрі зростає прозорість і простежуваність товарних потоків, зменшується розрив між обліковими та фактичними залишками, знижується ризик втрат, крадіжок і маніпуляцій із даними. Інтеграція блокчейну з ERP-, WMS-системами та IoT-пристроями створює можливість отримувати більш точну й актуальну інформацію про запаси, яку можуть використовувати класичні моделі (EOQ, (Q, R), ABC/XYZ тощо) для ухвалення більш обґрунтованих рішень. Смарт-контракти, у свою чергу, дозволяють автоматизувати частину функцій контролю та виконання договірних умов, прив'язавши їх до фактичних даних про рух і стан запасів.

Узагальнюючи результати розділу, можна зробити висновок, що поєднання теорії управління запасами із можливостями блокчейн-технологій формує методологічну основу для побудови нових моделей управління запасами у складних багаторівневих ланцюгах постачання. Блокчейн доцільно розглядати як надбудову над традиційними та сучасними моделями, яка забезпечує вищий рівень довіри до даних, прозорість взаємодії та можливість більш точного моделювання процесів. Це створює підґрунтя для подальших досліджень, пов'язаних із розробкою конкретних блокчейн-рішень у сфері управління запасами, їхньою кількісною оцінкою та аналізом економічної доцільності впровадження на реальних підприємствах.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ БЛОКЧЕЙНУ В ЛАНЦЮГАХ ПОСТАЧАННЯ

2.1 Світові тенденції цифровізації управління запасами

За останні роки управління запасами у світі перестало бути тільки питанням “скільки замовити і куди поставити”. Це вже складна гра на перетині аналітики, автоматизації, логістики, ІТ та стратегічного менеджменту. Якщо раніше багато рішень приймалися “на око” або на основі запізнілих звітів, то нині компанії усе більше спираються на цифрові платформи, дані в реальному часі та алгоритми, які допомагають бачити ситуацію по всьому ланцюгу постачання, а не лише в межах одного складу чи підприємства.

Цифровізація управління запасами - це не один інструмент, а цілий комплекс тенденцій: від сенсоризації складів і роботизації до використання штучного інтелекту, цифрових двійників і спільних платформ, де партнери обмінюються даними. На цьому фоні блокчейн з’являється не як щось відірване від реальності, а як логічний продовжувач цих процесів, орієнтований на прозорість і довіру до інформації.

Традиційний підхід до управління запасами будувався навколо періодичних звітів. Раз на тиждень, раз на місяць або навіть рідше менеджери отримували дані про продажі й залишки, аналізували їх вручну чи в простих таблицях і вирішували, що дозамовити. Будь-яка зміна - раптовий сплеск попиту, затримка поставки чи несподівана акція конкурента - потрапляла в поле зору із запізненням.

Це породжувало типову “гойдалку”: сьогодні дефіцит, завтра - переповнені склади. Щоб перестраховатися, компанії тримали завищені страхові запаси, а потім списували частину товару або продавали зі знижками.

Сучасна тенденція інша: переходять від реакції “після факту” до управління на основі даних у режимі, максимально наближеному до реального часу. Продажі, отримання товару, переміщення між складами, бронювання під замовлення - усе це фіксується й аналізується автоматично. В результаті

управлінські рішення - “скільки замовити”, “які запаси тримати в якій локації”, “який товар переносити, а який розпродавати” - ґрунтуються вже не на суб’єктивній інтуїції, а на більш повній і свіжій інформації.

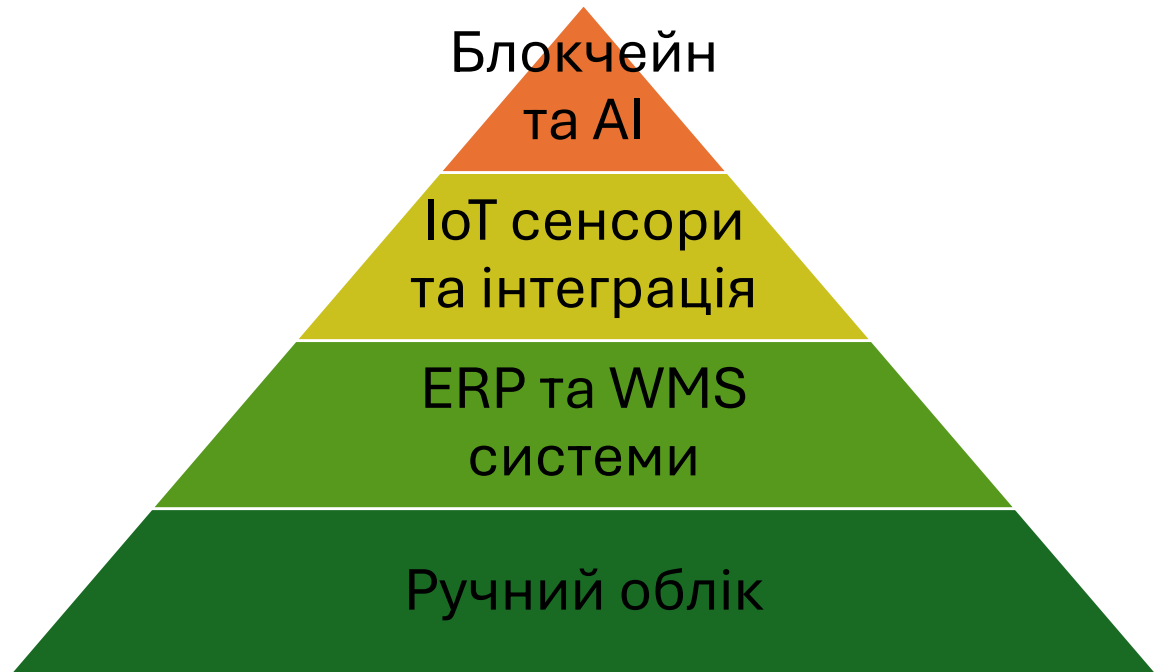


Рис. 2.1. Еволюція інструментів управління запасами в умовах Industry 4.0.

Це не означає, що людина зникла з процесу: навпаки, роль менеджера зростає. Просто фокус зміщується від механічних розрахунків до інтерпретації даних, налаштування політик, оцінки ризиків і сценарного планування.

Одна з ключових світових тенденцій - прагнення до наскрізної видимості ланцюга постачання. Багато великих компаній створюють так звані цифрові “control towers” - центри, де в єдиному інтерфейсі збирається інформація з ERP, WMS, TMS, інтернет-магазинів, маркетплейсів, транспортних сервісів, платформи перевізників.

Ідея проста: менеджер, дивлячись на екран, бачить живу картинку того, що відбувається з запасами і потоками: де товар уже прийшов, де ще в дорозі, що затримується, які склади “просідають” за ключовими позиціями, де можливі надлишки. Раніше для цього треба було піднімати десяток звітів у різних системах, телефонувати на склади, писати листи. Тепер це все збирається автоматично й візуалізується у вигляді панелей, карт, графіків.

З погляду управління запасами, control tower дає кілька важливих ефектів:

- швидше виявлення ризиків дефіциту та надлишків;
- можливість перерозподілу товару між складами, поки проблема не стала критичною;
- кращу координацію між закупівлями, продажами, виробництвом і логістикою.

Фактично це перехід від “кожен бачить тільки свою ділянку” до “усі ключові учасники ланцюга дивляться на одну картину”. У такому середовищі блокчейн у майбутньому може виступати як рівень, який гарантує, що ця “одна картина” ще й незмінна та прозора.

Ще одна стійка тенденція - насичення складів і ланцюгів постачання датчиками. Штрихкоди і сканери вже давно стали стандартом, але тепер до них додаються RFID-мітки, датчики температури, вологості, удару, GPS-трекери, розумні ваги й камери з комп’ютерним зором.

Кожна палета, контейнер або навіть окрема одиниця товару поступово перетворюється на “цифровий об’єкт”, який постійно “говорить” системі, де він знаходиться і що з ним відбувається. Наприклад, молочний продукт чи вакцина може не просто прибути на склад, а весь шлях фіксуватися з контролем температурного режиму. Будь-яке відхилення автоматично потрапляє в систему, і менеджмент розуміє, що ця партія запасів потенційно проблемна.

На рисунку 2.1 наведено узагальнену схему функціонування ланцюга постачання, у якій ключові логістичні процеси синхронізуються за допомогою блокчейн-реєстру та смарт-контрактів.

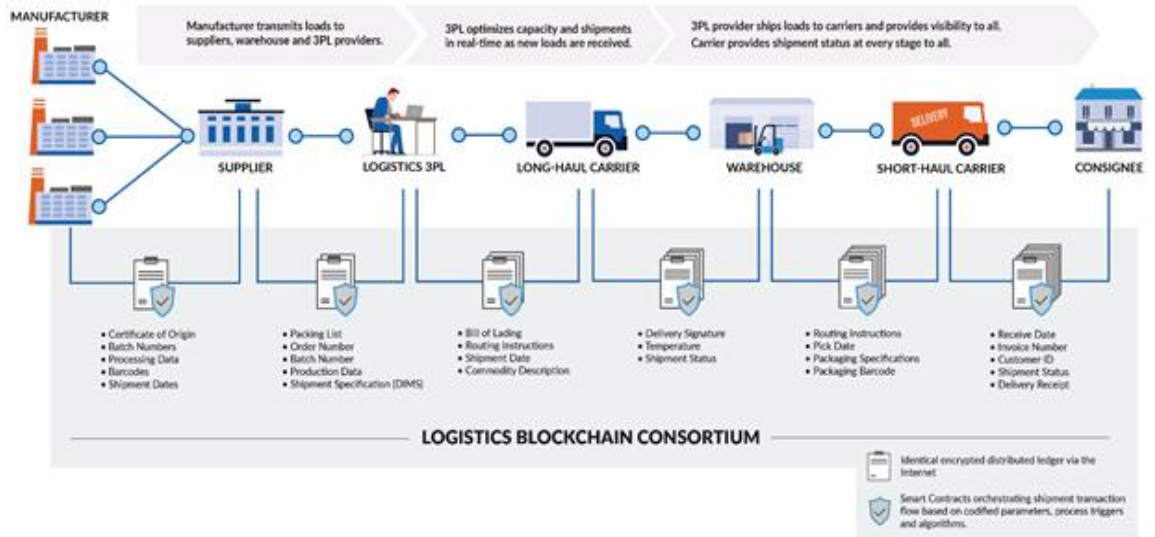


Рисунок 2.1 Узагальнена схема логістичного ланцюга з використанням блокчейн-консорціуму

Із точки зору обліку, сенсоризація означає значне зменшення розриву між “на папері” й “у житті”. Якщо раніше неточності й помилки були практично неминучими, то нині багато операцій фіксуються автоматично: підняли палету навантажувачем - система вже знає, що вона переміщена; товар пройшов через ворота з RFID-рамкою - його статус змінився на “відвантажено”. Це створює набагато більш надійну базу для будь-яких моделей управління запасами.

Світові ринки складської робототехніки ростуть дуже швидко. Якщо ще десять років тому автоматизований склад був чимось екзотичним, то зараз роботи на складах - нормальна картина для великих логістичних операторів, міжнародних ритейлерів, виробників електроніки, автопромисловості, фармацевтики.

На практиці це виглядає по-різному: десь роботизовані стелажні системи самі підвозять контейнери до зони відбору, десь по складу тихо їздять мобільні платформи, доставляючи товари до працівників, а іноді товар переміщують і відбирають повністю автоматизовані лінії. Людина все ще потрібна, але вже не як “носій коробок”, а як оператор системи, налаштовувач, контролер якості.

Для управління запасами роботизація означає рівнішу, передбачуванішу обробку потоків. Менше “вузьких місць” на ручних операціях - менше несподіваних затримок. Швидша прийомка і відвантаження - менший час, коли товар формально вже прибув, але ще не доступний до продажу. І, що не менш важливо, точність: робот не переплутає комірку й не покладе товар “не туди”, якщо його правильно запрограмувати.

Штучний інтелект поступово із модного слова перетворюється на робочий інструмент. У сфері управління запасами його найчастіше використовують для прогнозування попиту, оптимізації параметрів замовлень, виявлення аномалій і класифікації номенклатури.

Класичні моделі, які опиралися на середні значення попиту й прості тренди, доповнюються алгоритмами, здатними одночасно враховувати десятки факторів: сезонність, календарні свята, промо-акції, погоду, ціни конкурентів, зміни в поведінці споживачів. Це дозволяє отримати більш “живий” прогноз і тонко налаштувати політики типу (Q, R), рівні страхових запасів, плани поповнення складів.

Друга важлива сфера застосування - пошук аномалій. Наприклад, система може автоматично сигналізувати, якщо раптово зник значний обсяг запасів, якщо з’явилися нетипові для цієї позиції повернення або якщо рівень списань у певному складі стабільно вищий, ніж в інших. Це допомагає виявляти помилки, крадіжки, логістичні проблеми ще до того, як вони виглянуть у фінансових звітах.

ШІ не відмінює класичні моделі управління запасами, а живить їх кращими даними: замість грубих припущень про попит і строки поставки в розпорядженні менеджера з’являються більш точні прогнози й сценарії.

Розвиток e-commerce і маркетплейсів докорінно змінив картину. Раніше було простіше: є центральний склад, є магазини, і завдання - забезпечити магазини товаром. Зараз клієнт може замовити товар онлайн з доставкою додому, замовити онлайн і забрати в магазині, прийти безпосередньо в

магазин, замовити через маркетплейс, скористатися пунктом видачі чи мікроскладом.

Для управління запасами це означає, що товар більше не “прив’язаний” жорстко до одного каналу. Запаси повинні бути доступними там, де зручно клієнту, а не тільки з точки зору внутрішньої логістики. У відповідь на це з’являються dark stores, мікрофулфілмент-центри, гнучкі формати складів, коли одні й ті ж квадратні метри можуть одночасно обслуговувати і онлайн, і офлайн-потоки.

Цифрові системи тут виконують ключову роль: вони стежать за тим, щоб один і той самий товар не був “проданий тричі” в різних каналах, допомагають вирішувати, звідки саме відвантажувати конкретне замовлення, і дають змогу бачити запас як єдиний ресурс, а не як окремі “острівці” по каналах.

Ще один тренд, який уже неможливо ігнорувати, - зростання вимог до екологічної та соціальної відповідальності бізнесу. Управління запасами тут також має значення.

Занадто великі запаси - це не тільки заморожені гроші, а й зайва площа складів, енерговитрати на їх утримання, додаткові викиди при транспортуванні. Занадто часті списання - це реальні тонни продукції, яка відправляється на смітник або переробку. Повернення товарів у e-commerce - це додаткові логістичні плечі, упаковка, утилізація.

Цифрові системи дозволяють не просто рахувати зарплату й складські витрати, а й відстежувати екологічний “слід” операцій із запасами: скільки викидів припадає на одиницю продукції, які категорії товарів дають найбільше списань, де можна скоротити надлишки без втрати сервісу для клієнта. У деяких моделях навіть закладають “вартість вуглецю” як окремий вид витрат при оптимізації ланцюга постачання.

У цьому контексті прозорість і простежуваність, які може дати блокчейн, набувають додаткової ваги: якщо можна підтвердити походження товару, умови його транспортування та зберігання, простіше будувати “зелені” ланцюги постачання і доводити свою відповідальність.

Щоб усі описані вище підходи працювали на повну, недостатньо мати розумну систему всередині однієї компанії. Потрібно, щоб і постачальники, і логісти, і дистриб'ютори, і роздрібні мережі були готові ділитися ключовими даними. Саме тому в світі активно розвиваються спільні цифрові платформи для ланцюгів постачання.

Часто це виглядає як “екосистеми” навколо великих гравців: виробник або рітейлер створює платформу, до якої під'єднуються партнери. На ній узгоджуються плани продажів і виробництва, обмінюються прогнозами, показниками заповненості складів, параметрами сервісу. У більш рівноправних консорціумах компанії разом будують інфраструктуру, домовляючись про стандарти обміну даними та правила доступу.

У такому середовищі питання довіри до даних виходить на перший план. Чим більше учасників, тим складніше всім повірити просто “на слово”. Тут якраз і з'являється простір для блокчейну: він може фіксувати ключові події й документи у спільному незмінному реєстрі, виступаючи “арбітером”, який нікому не належить, але яким усі користуються.

Сучасні тенденції також включають розвиток цифрових двійників - віртуальних моделей складів, логістичних мереж і ланцюгів постачання, які синхронізуються з реальністю через дані з систем та датчиків.

Управління запасами в такій парадигмі набуває нового виміру: можна “програти” різні сценарії до того, як вони стануть реальністю. Що буде із запасами, якщо один із постачальників зупиниться на місяць? Як зміниться структура запасів, якщо скоротити кількість складів і збільшити частоту доставок? Який вплив на сервіс матиме зменшення страхових запасів у певній групі товарів?

Цифрові двійники дозволяють відповідати на ці запитання не на рівні абстрактних роздумів, а на основі моделювання, прив'язаного до конкретних даних. Це знижує ризики неправильних рішень і допомагає обґрунтувати інвестиції в автоматизацію, зміну мережі складів, роботизацію чи впровадження нових технологій, включно з блокчейном.

При всіх перевагах цифровізації, вона приносить із собою і нові виклики. Не всі компанії мають ресурси для впровадження складних систем. Не всюди є люди, які розуміють і техніку, і логістику, і економіку одночасно. Чим більше даних циркулює в електронному вигляді, тим гострішим стає питання їхнього захисту. Стандарти обміну даними не завжди узгоджені, інтеграція систем різних виробників нерідко перетворюється на довготривалий проєкт.

На цьому фоні блокчейн не вирішує всі проблеми, але пропонує відповідь принаймні на одну з них: як зробити так, щоб дані, якими обмінюються учасники ланцюга, були прозорими, незмінними та мали зрозумілу історію. Саме тому тема блокчейну природно “вростає” у загальний контекст цифровізації управління запасами, а не висить окремо.

Узагальнюючи, можна сказати, що світові тенденції цифровізації ведуть до більш розумних, гнучких і прозорих систем управління запасами. Дані в реальному часі, IoT, роботизація, штучний інтелект, цифрові двійники та спільні платформи створюють передумови для того, щоб блокчейн став одним із ключових інструментів підвищення довіри й контролю в цих системах. У наступних підпунктах і розділах доцільно перейти від опису тенденцій до конкретних прикладів застосування блокчейну в ланцюгах постачання та моделювання таких систем.

2.2 Економічні переваги та ризики блокчейн-рішень

Після того як у попередніх підрозділах було розглянуто теоретичні основи блокчейну та світові тенденції цифровізації управління запасами, логічним кроком є аналіз того, що дає блокчейн з економічної точки зору. Для бізнесу важливо не те, наскільки “просунутою” виглядає технологія, а те, чи здатна вона зменшити витрати, збільшити доходи, знизити ризики та підвищити конкурентоспроможність.

Блокчейн у ланцюгах постачання зазвичай подають як інструмент прозорості, простежуваності та довіри. Але за цими загальними словами стоять цілком конкретні економічні ефекти: зниження транзакційних витрат,

скорочення часу обробки документів, зменшення запасів “на всяк випадок”, зниження втрат від шахрайства та помилок, поява можливості преміального ціноутворення завдяки підтверженому походженню продукту. Водночас блокчейн-рішення пов’язані з істотними витратами на впровадження, технічними обмеженнями, високими вимогами до координації між учасниками та ризиками того, що проєкт так і не вийде за межі пілота.

Якщо узагальнити, блокчейн впливає на економіку ланцюгів постачання в трьох основних вимірах:

- через скорочення витрат (transaction cost, адміністративні витрати, втрати від неточностей та шахрайства);
- через збільшення доходів (кращий сервіс, нові бізнес-моделі, преміальний імідж, доступ до нових ринків);
- через зміну профілю ризиків (менше операційних та репутаційних ризиків, але більше технологічних, регуляторних і координаційних).

Блокчейн не є “чарівною кнопкою економії”. Його ефект залежить від того, в які процеси він вбудовується, наскільки ці процеси сьогодні неефективні, чи готові учасники ділитися даними й змінювати звичні схеми роботи. У ланцюгах із великою кількістю посередників, паперових документів, ручних звірок і низьким рівнем довіри потенційний економічний вигаш значно більший, ніж у відносно коротких і добре автоматизованих ланцюгах.

Одним із ключових аргументів на користь блокчейну є скорочення транзакційних витрат. У класичній логістиці й міжнародній торгівлі значна частина витрат - це не сама фізична доставка, а супровідні операції: оформлення документів, звірка рахунків, підтвердження права власності, погодження змін, перевірка автентичності сертифікатів.

Кожен учасник - виробник, перевізник, митний брокер, банк, страхова компанія, портовий оператор, одержувач - веде свою базу даних і працює зі своїм комплектом документів. Через це виникають дублювання, помилки, затримки. Часто потрібні треті сторони (нотаріуси, банки, інспектори), які

виконують роль “гарантів” у цій взаємній недовірі - і, відповідно, беруть за це комісію.

Блокчейн, правильно інтегрований у такі процеси, дозволяє:

- мати єдину для всіх сторін “версію правди”, де кожна важлива подія (відвантаження, передання права власності, проходження митниці) фіксується один раз і стає доступною за погодженими правилами;
- автоматизувати частину звірок, адже дані в блокчейні не потрібно “перенабирати” в кожному системі окремо;
- скоротити потребу в проміжних верифікаційних ланках, якщо правила перевірки вбудовані в смарт-контракти.

Практично це проявляється у зменшенні кількості ручних операцій, швидшому погодженні документів, меншому обсязі паперових архівів і коротшому циклі “замовлення-поставка-оплата”. Для запасів це означає, що оборотний капітал менше “застрягає” у затриманих партіях та невчасно оформлених платежах.

Прозорість і простежуваність часто подаються як щось “моральне” або репутаційне, але насправді це ще й дуже конкретна економічна перевага. Коли компанія має повну картину руху товару - від сировини до кінцевого покупця - вона краще розуміє, де виникають затримки, де накопичуються зайві запаси, де найчастіше стаються помилки, крадіжки, псування.

Блокчейн дає можливість створити незмінну історію життя кожної партії або навіть кожної одиниці товару. Якщо до нього “прив’язати” інформацію з датчиків, сканерів, систем відстеження, у компанії з’являється новий аналітичний ресурс: можна виявити типові “вузькі місця” в ланцюзі постачання, виміряти реальний час проходження кожного етапу, зрозуміти, які контрагенти створюють найбільші ризики.

Це має прямий вплив на економіку управління запасами. Наприклад:

- точніша інформація про реальний шлях і час доставки дозволяє зменшити страхові запаси, не ризикуючи дефіцитом;

- можливість швидко локалізувати проблемну партію (у разі браку або ризиків безпеки) знижує обсяг відкликаною товару і втрат;
- зменшення розриву між “обліковим” і “фактичним” рівнем запасів дозволяє уникати ситуацій, коли система показує товар, якого на складі вже немає.

Якісні дані стають активом, на основі якого моделі управління запасами (у тому числі класичні EOQ, (Q, R), ABC/XYZ) працюють ближче до реальності, а не до “ідеальної картини”.

Блокчейн прямо не “рачує” оптимальний розмір замовлення, але впливає на ключові параметри, що визначають обсяг запасів: невизначеність попиту, час виконання замовлення, надійність постачальника, ризик затримок і помилок.

Якщо завдяки прозорості й простежуваності компанія краще розуміє реальний попит (наприклад, бачить дані не лише свого безпосереднього клієнта, а й кінцевих продажів), може будувати більш точні прогнози. Якщо вона має достовірну інформацію про проходження вантажів, коливання фактичних строків доставки, поведінку постачальників, параметри моделі управління запасами можуть бути підлаштовані під більш “спокійну” картину.

З економічної точки зору це дає три групи ефектів:

1. Зменшення середнього рівня запасів при тому самому або навіть вищому рівні сервісу.
2. Скорочення втрат від дефіциту (недопродажі, штрафи, репутаційні ризики), оскільки проблемні ситуації стають більш передбачуваними.
3. Оптимізація розподілу запасів по мережі: прозора інформація дозволяє краще балансувати запаси між складами, країнами, каналами.

Ще один аспект - зниження “усушки-утруски”, тобто втрат запасів через крадіжки, списання, пересортицю. У міру того як кожен рух товару фіксується в спільному реєстрі, з прив’язкою до конкретного етапу і відповідального, можливості “тихих схем” стають меншими, а ризики для тих, хто намагається маніпулювати запасами, - вищими.

Таким чином, блокчейн може допомогти зменшити обсяг оборотного капіталу, замороженого в запасах, та одночасно знизити ризики, пов'язані з їхнім обігом.

Окрім зменшення витрат, блокчейн відкриває можливості для створення нових джерел доходу. Простежуваність походження товарів, підтвердження автентичності, фіксація умов виробництва й транспортування - усе це можна перетворити на елемент ціннісної пропозиції.

Виробники продуктів харчування, фармацевтики, одягу, техніки можуть використовувати блокчейн, щоб довести споживачу: товар справді має той склад, походження, сертифікацію, які заявлені. Для окремих категорій клієнтів (преміальні сегменти, ринки з високими вимогами до безпеки, екологічні та етичні стандарти) це може означати готовність платити більше.

Інший напрям - сервісні моделі, де ключовим стає не продаж товару, а продаж “функції” або “результату”. Наприклад, постачальник обладнання може залишати право власності за собою, а клієнт платитиме за години роботи чи вироблений обсяг. Блокчейн у такому разі може виступати інфраструктурою для фіксації фактичного використання і розрахунку платежів.

Для учасників ланцюга постачання блокчейн-платформи можуть стати основою нових послуг: від цифрових “паспортів” товарів до фінансових продуктів, де доступ до фінансування прив'язаний до реального руху вантажу, зафіксованого в реєстрі.

Проте тут важливо розуміти, що економічний ефект від нових бізнес-моделей з'являється не автоматично. Потрібен достатній масштаб, готовність ринку приймати такі формати й конкурентна перевага, яка справді важлива для клієнта, а не лише “технологічний маркетинг”.

На іншій шальці терезів - витрати. Вони включають не лише технічну частину (розробка, ліцензії, хостинг), а й інтеграцію, зміну процесів, навчання персоналу, координацію з партнерами.

Для блокчейн-проєкту в ланцюзі постачання потрібно:

- розробити або обрати платформу (публічний, приватний чи консорціумний блокчейн);
- інтегрувати її з існуючими системами (ERP, WMS, TMS, e-commerce, IoT);
- визначити структуру даних, правила доступу, права та обов'язки учасників;
- налаштувати смарт-контракти, перевірити їхню коректність і безпеку;
- організувати підтримку, оновлення, моніторинг і аудит системи.

Крім первинних інвестицій, є операційні витрати: плата за інфраструктуру, робота команди підтримки, оновлення програмного забезпечення, аудит безпеки, адміністрування доступів, розширення функціоналу.

Окремо стоїть питання масштабування. У міру зростання кількості транзакцій, учасників та обсягу даних зростають і вимоги до продуктивності й надійності системи. У деяких випадках це може вимагати додаткових інвестицій у модернізацію, особливо якщо початкове рішення було розраховане на менший масштаб.

Блокчейн-рішення не позбавлені технологічних обмежень. Класичні проблеми - продуктивність, масштабованість, затримки підтвердження транзакцій, складність конфіденційності в умовах прозорого реєстру.

У публічних блокчейнах важливою темою є енергоспоживання й пропускна здатність. У корпоративних, консорціумних рішеннях ці проблеми частково пом'якшуються, але натомість виникають інші: необхідність підтримувати окрему інфраструктуру, забезпечувати сумісність між вузлами різних організацій, інтегрувати блокчейн із внутрішніми системами без подвійного обліку та розривів у даних.

Технологічні ризики включають:

- можливі вразливості в реалізації смарт-контрактів, які важко “виправити заднім числом”, якщо логіка уже зафіксована й використовується;

- проблеми з оновленням протоколів, коли різні учасники не синхронізовані в часі;
- потенційні збої на рівні інфраструктури (мережа, дата-центри, вузли окремих учасників), які можуть тимчасово блокувати доступ до даних.

Якщо такі ризики реалізуються, це може привести не лише до додаткових витрат на відновлення, а й до прямих економічних втрат - наприклад, при неможливості вчасно підтвердити статус вантажу, оформити документи, запустити оплату.

Окрім технічних, є цілий пласт організаційних і правових ризиків.

По-перше, блокчейн у ланцюгах постачання майже завжди передбачає мультисторонню взаємодію. Економічний ефект з'являється лише тоді, коли до платформи приєднується критична маса учасників: виробники, логісти, порти, брокери, банки, покупці. Якщо долучаються лише одна-дві компанії, їхні вигоди обмежені, а витрати можуть виявитися непропорційно високими.

По-друге, потрібна узгоджена модель управління: хто приймає рішення щодо змін, як розподіляються витрати й вигоди, що відбувається при вході й виході учасників, як розв'язуються конфлікти. Відповіді на ці питання впливають на економічну стійкість проєкту не менше, ніж сама технологія.

По-третє, правове поле для блокчейн-рішень у багатьох країнах ще формується. Не завжди зрозуміло, як статус запису в блокчейні співвідноситься з юридичним статусом паперового чи електронного документа, які вимоги до зберігання й доступу до даних, хто несе відповідальність при помилках у записах, чи приймаються такі дані судами та регуляторами. Це створює регуляторний ризик, який важко прорахувати наперед.

Ринкові ризики проявляються в тому, що навіть технологічно успішний проєкт може виявитися економічно невивідним, якщо:

- не вдалося залучити достатню кількість партнерів;
- з'явилися альтернативні рішення (не обов'язково блокчейн), які вирішують ті ж проблеми простіше й дешевше;

- вихід із платформи ключових гравців знижує її цінність для решти.

Приклади реальних проєктів показують, що частина ініціатив, які розглядалися як “революційні”, у підсумку були згорнуті саме через відсутність стійкої економічної моделі та недостатню галузеву підтримку.

Щоб блокчейн-рішення в управлінні запасами було економічно доцільним, зазвичай мають виконуватися кілька умов.

По-перше, у ланцюгу повинні існувати суттєві транзакційні витрати, пов’язані з недовірою, дублюванням обліку, складними погодженнями, великим обсягом паперових документів. Якщо процеси й так добре автоматизовані, транзакційні витрати низькі, а довіра між учасниками висока, ефект від блокчейну буде меншим.

По-друге, потрібен реальний запит на прозорість і простежуваність з боку ринку: регуляторів, клієнтів, партнерів. Якщо немає зовнішнього тиску або внутрішньої стратегії, що робить прозорість конкурентною перевагою, компанії можуть не бути готовими вкладатися в спільну інфраструктуру.

По-третє, необхідна готовність ключових учасників координуватися та домовлятися про правила гри, включно з розподілом витрат і вигод. Без цього навіть технічно якісний проєкт ризикує залишитися локальним пілотом.

По-четверте, блокчейн має бути інтегрований у ширший контекст цифровізації: сенсоризація, автоматизований облік, ERP, WMS, системи прогнозування. Якщо на “вході” в блокчейн потрапляють неточні або ручні дані, вигоди від незмінності реєстру будуть обмеженими.

У такій конфігурації блокчейн виступає не окремою “фішкою”, а логічним елементом цифрової трансформації, який, у кращому випадку, окупається за рахунок економії на транзакційних витратах, зниження запасів, зменшення втрат і появи нових джерел доходу.

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)
1. Повна прозорість руху товарів (Traceability).	1. Висока вартість розробки та впровадження.

<ol style="list-style-type: none"> 2. Незмінність історичних даних (захист від підробок). 3. Автоматизація процесів через смарт-контракти. 4. Зниження витрат на звірку даних та аудит. 	<ol style="list-style-type: none"> 2. Складність інтеграції з існуючими ERP-системами. 3. Низька швидкість транзакцій (у публічних мережах). 4. Залежність від якості вхідних даних (проблема "сміття на вході").
<p>Можливості (Opportunities)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Доступ до дешевого торгового фінансування (Supply Chain Finance). 2. Створення цифрових паспортів продуктів для захисту бренду. 3. Підвищення довіри споживачів та ESG-рейтингів. 4. Перехід до моделей "Just-in-Time" завдяки точним даним. 	<p>Загрози (Threats)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Невизначеність правового регулювання смарт-контрактів. 2. Кіберризика на рівні інтерфейсів та оракулів. 3. Опір персоналу та партнерів змінам бізнес-процесів. 4. Ризик створення "цифрових островів" без єдиних стандартів.

Рис. 2.2. SWOT-аналіз впровадження блокчейн-технологій в управління запасами.

2.3 Практичні кейси використання блокчейну в управлінні запасами

Особливу цінність для нашого дослідження мають кейси, де блокчейн безпосередньо впливає на видимість запасів, швидкість простежуваності, обсяг страхових запасів, рівень втрат і точність обліку. Далі розглянемо кілька показових прикладів із харчової промисловості, фармацевтики, морської логістики, преміального сегмента та аграрного сектору.

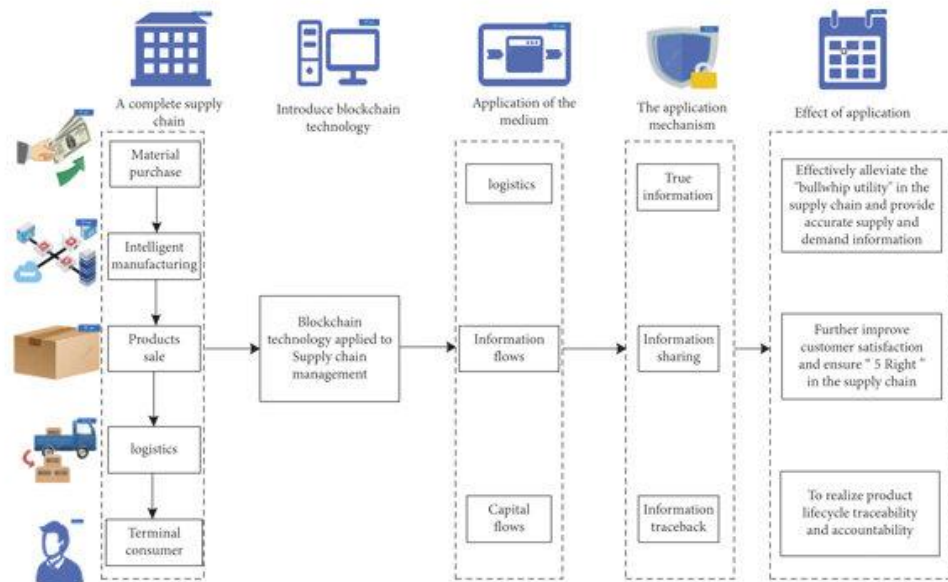
Одним із найбільш цитованих реальних кейсів є співпраця Walmart із платформою IBM Food Trust. Ще кілька років тому компанія провела пілотний

проект з простежуваності манго, що постачалися до магазинів у США. До впровадження блокчейну, щоб встановити, з якої ферми походить конкретна партія манго, фахівцям Walmart знадобилося кілька днів: потрібно було піднімати паперові документи, звіряти партії, контактувати з постачальниками та логістичними компаніями. Після впровадження блокчейн-рішення на основі Hyperledger Fabric ту саму задачу вдалося розв’язати за лічені секунди.

Суть підходу полягає в тому, що всі ключові події в життєвому циклі продукції - збір урожаю, сортування, фасування, транспортування, перетин кордонів, надходження на розподільчі центри та магазини - фіксуються у спільному реєстрі IBM Food Trust. Цей реєстр розподілений між учасниками й будується на блокчейн-технології, що ускладнює підміну даних заднім числом і дає кожному учаснику доступ до єдиної “версії правди”.

На рисунку 2.4 подано типову модель впливу блокчейн-технологій на процеси управління постачанням, яка лежить в основі більшості сучасних комерційних кейсів.

Рисунок 2.4



Для управління запасами Walmart це має декілька практичних наслідків.

По-перше, при виявленні проблемної партії (наприклад, підозри на мікробіологічне забруднення) компанія може точково відкликати саме ті

запаси, які справді пов'язані з ризиком, а не знімати з полиць цілі категорії товарів. Це прямо зменшує обсяг списань, втрати виручки й операційні витрати на відкличання.

По-друге, прозорість походження продукту підвищує довіру регуляторів і споживачів. Для Walmart це означає можливість працювати з більш “тонкими” запасами у категоріях, де безпека особливо важлива: листові овочі, свіже м'ясо, риба. Коли компанія впевнена, що за потреби швидко знайде джерело проблеми, їй менше потрібно страхуватися великими запасами “на всяк випадок”.

По-третє, фіксація даних про партії, терміни придатності, умови транспортування й наповнення магазинів дає багатий масив історичної інформації для аналітики. На основі цієї інформації Walmart та інші учасники IBM Food Trust можуть точніше моделювати попит і час перебування товару в ланцюгу, коригувати параметри закупівель і рівень страхових запасів.

Схожі підходи застосовують і інші мережі, зокрема Carrefour у Європі, які також працюють із IBM Food Trust і відображають на етикетках товарів QR-коди, через які покупці можуть побачити основні етапи шляху продукту. Це, з одного боку, інструмент маркетингу, а з іншого - додатковий стимул для учасників ланцюга підтримувати високу точність даних про запаси.

У фармацевтичній галузі одним із найбільш відомих блокчейн-проектів є MediLedger. Це консорціум, у якому беруть участь такі компанії, як Bayer, Pfizer, Gilead та крупні дистриб'ютори на кшталт McKesson. Основна мета MediLedger - забезпечити відповідність вимогам щодо простежуваності ліків та боротьби з контрафактною продукцією, зокрема вимогам американського закону Drug Supply Chain Security Act.

Платформа MediLedger дозволяє відстежувати зміну права власності на лікарські засоби від виробника до оптового дистриб'ютора, далі до аптечної мережі чи лікарні. Кожна партія має серіалізовані ідентифікатори, а зміна власника фіксується в розподіленому реєстрі. Якщо спробувати повернути

препарат, який уже раніше був віднесений до іншого ланцюга, система виявить невідповідність.

З точки зору управління запасами на складі дистриб'ютора або аптеки це дає кілька ефектів.

По-перше, зменшується кількість “неврахованих” або сумнівних запасів, які виникають через подвійні продажі, несанкціоновані повернення або пересортицю. Коли кожна одиниця препарату має підтверджену історію, легше провести звірку між фактичними залишками і даними в системі.

По-друге, прискорюється і спрощується перевірка повернень. Раніше перевірка легальності й придатності до повторного продажу могла займати значний час і вимагати ручної роботи. MediLedger дозволяє робити це автоматизовано, що зменшує операційні витрати й прискорює обіг запасів.

По-третє, для виробників і регуляторів з'являється інструмент аналізу того, як довго запаси затримуються на певних ланках, де вони накопичуються, які канали мають надмірні залишки. Ця інформація дозволяє змінювати політики поставок, скорочувати “завислі” запаси й підвищувати доступність життєво необхідних препаратів.

MediLedger показує, що блокчейн може працювати в умовах складного, регульованого ринку, де висока частка дорогих, чутливих до умов зберігання запасів і жорсткі вимоги до простежуваності.

У сфері глобальної логістики показовим прикладом є платформа TradeLens, спільний проєкт A.P. Moller - Maersk та IBM. Ідея платформи полягала в тому, щоб створити блокчейн-реєстр, де відображаються ключові події контейнерних перевезень: завантаження й розвантаження, передання між перевізниками, проходження митниці, оформлення документів.

Для управління запасами TradeLens був цікавий тим, що дозволяв вантажовласникам бачити статус контейнерів у майже реальному часі, з інформацією, яка підтверджена всіма сторонами. Товар, що знаходиться в контейнері, - це фактично запас у дорозі, який часто складає значну частину оборотного капіталу компанії. Якщо інформація про його рух неточна або

надходить із запізненням, компанії змушені страхуватися більшими запасами в країні призначення.

Коли ж вантажовласник завдяки TradeLens міг бачити, де стоїть контейнер, які документи погоджені, а які ще в роботі, і як змінюється прогнозований час прибуття, рішення про рівень запасів у розподільчих центрах могли бути точнішими. У перспективі це створювало умови для скорочення надлишкових буферних запасів і кращої синхронізації “запасів на воді” й запасів у складах.

Однак кейс TradeLens показовий не лише з позитивного боку. У 2022 році Maersk і IBM оголосили, що платформа буде поетапно закрыта. Офіційна причина - недостатній рівень галузевої підтримки і відсутність повноцінної глобальної кооперації. Частина конкурентів Maersk не поспішала приєднуватися до платформи, побоюючись, що це зміцнить позиції одного гравця.

Це важливий урок для моделювання блокчейн-систем управління запасами: навіть якщо технологія працює й дає відчутний ефект для окремих учасників, без достатньо широкого залучення ринку економічна модель платформи може виявитися нестійкою. Успішність таких рішень залежить не лише від технічного дизайну, а й від збалансованості інтересів усіх сторін.

У сегменті преміальних товарів цікаві кейси демонструє платформа VeChain. Вона спеціалізується на застосуванні блокчейну в ланцюгах постачання та дозволяє брендам створювати цифрові “паспорти” продукції. Наприклад, для дорогого вина у блокчейні фіксуються дані про виноградник, рік врожаю, переробку, розлив, транспортування та продаж; для люксового годинника - інформація про виробника, серійний номер, дистриб'юторів і офіційні точки продажу.

VeChain співпрацює з різними компаніями в галузі моди, аксесуарів, їжі й напоїв. Аналогічні підходи застосовує Aura Blockchain Consortium, створений такими гравцями, як LVMH, Prada, OTB, Richemont. Aura формує цифрові паспорти товарів для брендів класу люкс, де на блокчейні фіксується

життєвий цикл кожного виробу - від виробництва до подальших передач між власниками.

Економічний ефект для управління запасами в таких кейсах проявляється в кількох площинах.

По-перше, знижується ризик потрапляння контрафакту до офіційних запасів. Коли кожен виріб має перевірюваний цифровий ідентифікатор, набагато складніше “змішати” підроблені товари з легальними на складі чи в магазині. Це важливо для точності обліку й для зменшення втрат, пов’язаних із виявленням підробок уже на пізніх етапах.

По-друге, для брендів люкс прозорість ланцюга постачання стає частиною ціннісної пропозиції. Покупці можуть за допомогою мобільного додатку перевірити історію конкретного виробу. Для компанії це не лише підвищення лояльності клієнтів, а й додаткове джерело даних про те, де й як рухаються запаси, які моделі частіше продаються через певні канали, де виникають затримки.

По-третє, цифрові паспорти товарів спрощують облік переміщень між складами й магазинами. У системі видно, які конкретні одиниці товару вийшли з одного складу й прибули на інший, що зменшує ризик пересортиці та дає змогу швидко проводити інвентаризацію.

У результаті VeChain та Augur демонструють, як блокчейн може одночасно вирішувати задачу захисту бренду й покращувати операційне управління запасами у високовартісних сегментах.

Таблиця 2.1

Практичні кейси застосування блокчейну в управлінні запасами

Компанія / платформа	Галузь	Що відстежують	Основний ефект для управління запасами
Walmart + IBM Food Trust	Харчова роздрібна торгівля	Шлях продуктів від ферми до полиці магазину	Швидке виявлення проблемних партій, зменшення списань, можливість зниження страхових запасів

Carrefour + IBM Food Trust	Харчова роздрібна торгівля	Простежуваність окремих категорій продуктів	Підвищення довіри споживачів, точніший облік партій
MediLedger	Фармацевтика	Ланцюг постачання лікарських засобів	Зниження ризику контрафакту, кращий контроль залишків і повернень
TradeLens (Maersk + IBM)	Контейнерна логістика	Рух контейнерів і супровідних документів	Краща видимість запасів “у дорозі”, потенціал зменшення запасів у пунктах призначення
VeChain	Преміум- товари,	Цифрові паспорти продукції, підтвердження автентичності	Прозорий облік партій, захист бренду, контролюваність запасів
Aura Blockchain Consortium	Люксові бренди	Життєвий цикл окремих виробів	Простежуваність руху товарів між складами й магазинами

В аграрному секторі блокчейн часто поєднується з концепцією регіональних продовольчих хабів, де зосереджені потужності зі зберігання та переробки продукції від багатьох дрібних фермерів. У наукових роботах описуються моделі, де блокчейн слугує основою для децентралізованої системи обліку запасів таких хабів.

Схема виглядає так: фермери постачають продукцію (овочі, фрукти, молоко, зерно) до місцевого логістичного центру. При прийманні кожна партія реєструється в блокчейні: фіксуються обсяги, якість, дата, назва господарства, базова ціна. Далі в реєстр записуються операції сортування, фасування, заморожування, відвантаження переробникам або ритейлерам. Якщо використовується “холодовий ланцюг”, дані з температурних датчиків також можуть бути прив’язані до конкретних партій.

Для управління запасами в такій системі виникає кілька важливих переваг.

По-перше, фермери й оператори хабу мають однакове уявлення про те, які запаси реально є в наявності, в якому стані вони перебувають та як швидко обертаються. Це зменшує конфлікти щодо кількості й якості продукції, знижує спокую працювати “в тіні” та підвищує прогнозованість грошових потоків.

По-друге, прозорий облік дозволяє точніше планувати завантаження холодильних камер і складів, що важливо для зменшення поствиробничих втрат. Коли оператор бачить, які партії мають обмежений строк придатності, а які можуть чекати довше, він може оптимально будувати черговість відвантажень і переробки.

По-третє, наявність достовірних даних про запаси, підтверджених блокчейном, відкриває доступ до фінансування. Банки або інвестори можуть розглядати ці запаси як більш надійне забезпечення, ніж у випадку, коли облік ведеться лише у внутрішніх таблицях хаба. Це важливо для розвитку інфраструктури зберігання та логістики, а в ширшому сенсі - для підвищення стійкості агропродовольчих ланцюгів.

Таким чином, навіть у відносно простих ланцюгах із локальною географією блокчейн може відігравати значну роль у підвищенні ефективності управління запасами.

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проаналізовано, як глобальні тенденції цифровізації змінюють управління запасами та яке місце в цьому процесі посідає блокчейн. Сучасні ланцюги постачання стають дедалі складнішими, багаторівневими й чутливими до ризиків, тому компанії змушені переходити від “ручного” й реактивного управління запасами до моделей, що спираються на дані в режимі, наближеному до реального часу. Інтернет речей, роботизація складів, системи класу control tower, штучний інтелект, цифрові двійники й омніканальні стратегії створюють принципово нове інформаційне середовище, у якому блокчейн виступає як шар довіри та прозорості між різними учасниками ланцюга.

Було показано, що економічні переваги блокчейн-рішень у ланцюгах постачання та управлінні запасами пов'язані насамперед зі зменшенням транзакційних витрат і невизначеності. Наявність спільного, незмінного реєстру подій дозволяє скоротити дублювання обліку, пришвидшити документообіг, знизити витрати на звірку даних і послуги посередників, мінімізувати втрати від помилок, шахрайства, контрафакту й “усушки-утруски”. Завдяки більш точній та доступній інформації про запаси на різних етапах ланцюга (на складі, у дорозі, у партнерів) компанії отримують можливість зменшувати страхові запаси, швидше реагувати на збої, точніше планувати поповнення та перерозподіл товару. Одночасно блокчейн відкриває шлях до нових бізнес-моделей, заснованих на підтвердженій простежуваності й цифрових паспортах продукції.

Разом з тим, аналіз показав, що впровадження блокчейн-рішень пов'язане з істотними витратами та ризиками. Потрібні інвестиції в інфраструктуру, інтеграцію з існуючими ІТ-системами, розробку смарт-контрактів, навчання персоналу. Успіх таких проєктів залежить не лише від технології, а й від готовності учасників домовлятися про єдині правила гри, ділитися даними й справедливо розподіляти витрати та вигоди. Додаткові виклики створюють питання масштабованості, кібербезпеки, правового статусу блокчейн-записів і нерівномірний рівень цифрової зрілості компаній. Приклади окремих ініціатив, які не вийшли за межі пілотів або були згорнуті, свідчать про те, що без достатньої галузевої підтримки та чіткої економічної мотивації навіть технічно якісні рішення можуть виявитися нежиттєздатними.

Практичні кейси великих гравців - таких як Walmart і Carrefour у харчовому ритейлі, участь фармацевтичних компаній у проєктах на кшталт MediLedger, досвід платформи TradeLens у контейнерній логістиці, рішення VeChain та Aura у преміальному сегменті, а також пілоти в аграрних продовольчих хабах - підтверджують, що блокчейн здатний реально покращувати видимість і контроль запасів, але лише як частина ширшої цифрової екосистеми. Загалом результати розділу 2 дозволяють зробити

висновок, що блокчейн доцільно розглядати не як самодостатню “панацею”, а як інструмент підсилення вже наявних моделей управління запасами в умовах багатосторонньої взаємодії та високої цінності достовірних даних. Це створює методологічне підґрунтя для подальшого, більш прикладного моделювання блокчейн-систем управління запасами у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ БЛОКЧЕЙН-МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ

3.1 Постановка задачі та система економічних показників

Впровадження технологій розподіленого реєстру (Blockchain) у логістичні системи та управління запасами є складною задачею багатокритеріальної оптимізації. Для коректного моделювання необхідно формалізувати об'єкт дослідження, визначити межі системи, сформулювати цільову функцію та систему обмежень, а також обґрунтувати вибір ключових показників ефективності (KPI), за якими буде здійснюватися порівняння традиційної («AS-IS») та інноваційної («TO-BE») моделей.

Об'єктом моделювання виступає система управління запасами торговельно-виробничого підприємства, інтегрована в розгалужений ланцюг постачання. Специфіка об'єкта полягає у наявності стохастичного попиту з боку кінцевих споживачів та невизначеності (варіативності) часу виконання замовлень з боку постачальників.

В умовах традиційної системи управління (сценарій «AS-IS») інформаційні потоки між учасниками ланцюга (постачальник сировини - виробник - дистриб'ютор - ритейлер) є дискретними та фрагментованими. Кожен учасник використовує власну ERP-систему, а обмін даними відбувається через EDI-протоколи, електронну пошту або паперовий документообіг. Це призводить до виникнення наступних проблем, які мають бути вирішені в ході моделювання:

1. Інформаційна асиметрія: Учасники ланцюга не мають доступу до даних про реальні запаси партнерів у режимі реального часу. Це змушує кожного контрагента формувати надлишкові страхові запаси (Safety Stock) для покриття ризиків невизначеності.
2. Ефект «батога» (Bullwhip Effect): Незначні коливання попиту на рівні кінцевого споживача призводять до значних амплітудних коливань замовлень на рівні виробника та постачальника сировини. Це явище спричинене затримками в передачі інформації та її спотворенням при проходженні через численні ланки.
3. Високі транзакційні витрати: Значна частка операційних витрат припадає на ручну звірку накладних, вирішення диспутів щодо кількості

та якості поставленої продукції, а також на адміністративний супровід контрактів.

4. Ризики контрафакту та втрат: Відсутність наскрізної простежуваності (Traceability) ускладнює виявлення джерела браку або втрат продукції під час транспортування.

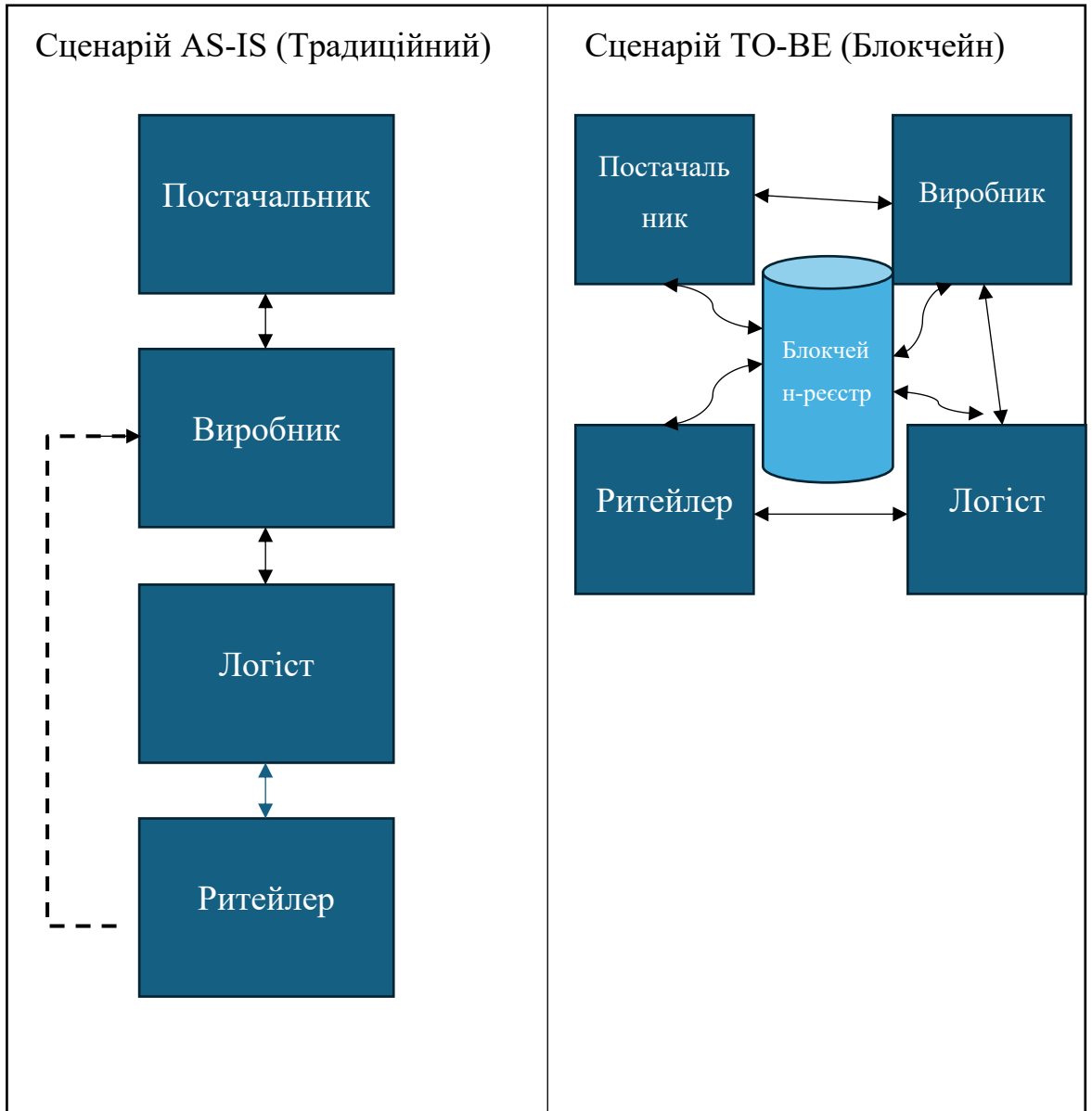


Рис. 3.2. Трансформація інформаційних потоків при переході до блокчейн-моделі.

Метою моделювання є розробка та кількісна оцінка ефективності системи управління запасами, що базується на використанні приватного блокчейну (Private Blockchain) та смарт-контрактів для автоматизації процесів поповнення запасів.

Задачу оптимізації управління запасами в умовах впровадження блокчейну можна сформулювати як задачу мінімізації сукупних логістичних витрат при забезпеченні заданого рівня сервісу.

Нехай T - період планування (наприклад, 1 рік = 365 днів). Розглядаємо однопродуктову модель (для репрезентативної вибірки товарів групи А за АВС-аналізом).

Цільова функція (Objective Function):

Критерієм оптимальності обрано мінімум математичного сподівання сукупних витрат (TC – *Total Cost*):

$$TC = TC_{hold} + TC_{order} + TC_{short} + TC_{tech} \rightarrow \min:$$

1. TC_{hold} (Holding Costs) - витрати на утримання запасів. Включають альтернативну вартість капіталу, замороженого в запасах, витрати на складське зберігання, страхування, а також втрати від псування та морального старіння.
2. TC_{order} (Ordering Costs) - витрати на виконання замовлень. Включають адміністративні витрати на обробку замовлення, транспортні витрати (якщо вони залежать від частоти), витрати на вхідний контроль якості.
3. TC_{short} (Shortage Costs) - втрати від дефіциту. Включають упущену вигоду від нереалізованої продукції, штрафні санкції за невиконання контрактів та довгострокові репутаційні втрати.
4. TC_{tech} (Technology Costs) - витрати на впровадження та експлуатацію блокчейн-системи (специфічна компонента для сценарію «ТО-ВЕ»).

Розкриємо складові цільової функції більш детально.

1. Витрати на утримання запасів (TC_{hold}):

$$TC_{hold} = h \cdot C \cdot \left(\frac{Q}{2} + SS \right)$$

де:

- h - річна ставка витрат на зберігання (у % від вартості одиниці товару);
- C - закупівельна ціна одиниці товару;
- Q - розмір партії замовлення (Order Quantity);
- $\frac{Q}{2}$ - середній рівень поточного (циклічного) запасу;

- SS - страховий запас (Safety Stock).

2. Витрати на виконання замовлень (TC_{order}):

$$TC_{order} = \frac{D}{Q} \cdot (A + c_{trans})$$

де:

- D - річний попит на товар (у натуральних одиницях);
- A - фіксовані витрати на оформлення одного замовлення (в традиційній системі включають працю менеджерів, зв'язок, папір);
- c_{trans} - транзакційні витрати на обробку платежу та верифікацію документів.

3. Втрати від дефіциту (TC_{short}):

$$TC_{short} = \pi \cdot E(n_{short})$$

де:

- π - вартість дефіциту одиниці продукції (штраф + упущена маржа);
- $E(n_{short})$ - математичне сподівання кількості дефіцитних одиниць за період.

4. Технологічні витрати (TC_{tech}):

Для традиційної системи $TC_{tech} \approx 0$ (або включені в загальні ІТ-витрати).

Для блокчейн-системи:

$$TC_{tech} = I_{setup} + N_{tx} \cdot Fee_{tx}$$

де:

- I_{setup} - амортизація капітальних витрат на розгортання вузлів мережі;
- N_{tx} - кількість транзакцій (записів у блокчейн);
- Fee_{tx} - вартість обробки однієї транзакції (gas fee або витрати на підтримку інфраструктури).

Щоб модель була адекватною реальним умовам функціонування підприємства, необхідно ввести ряд обмежень та припущень.

Основні обмеження:

1. Обмеження складської потужності: Сумарний обсяг запасів не повинен перевищувати місткість складу (W_{max}):

$$(Q + SS) \cdot v \leq W_{max}$$

де v - об'єм, який займає одиниця продукції.

2. Фінансові обмеження: Бюджет, виділений на закупівлю запасів та їх утримання, є обмеженим величиною B :

$$C \cdot (Q + SS) \leq B$$

3. Обмеження рівня сервісу: Ймовірність відсутності дефіциту під час циклу виконання замовлення повинна бути не нижчою за цільовий рівень $P_{service}$ (наприклад, 95% або 99%):

$$P(Stock \geq 0) \geq P_{service}$$

Припущення стохастичної моделі:

1. Попит (d_t): Розглядається як випадкова величина, розподілена за нормальним законом $N(\mu_D, \sigma_D)$, де μ_D - середній попит за одиницю часу, σ_D - стандартне відхилення попиту. Це припущення базується на Центральній граничній теоремі для товарів з високою інтенсивністю продажів.
2. Час виконання замовлення (L): У традиційній моделі час поставки є випадковою величиною $L \sim N(\mu_L, \sigma_L)$, що характеризується значною дисперсією через організаційні затримки.
3. Вплив блокчейну: Впровадження блокчейн-технології в моделі інтерпретується як фактор, що перетворює стохастичну величину часу поставки на квазі-детерміновану або суттєво зменшує її дисперсію ($\sigma_L \rightarrow min$), а також знижує адміністративну складову витрат на замовлення (A).

Для комплексного аналізу результатів моделювання недостатньо розрахувати лише загальні витрати. Необхідно сформулювати збалансовану систему показників, яка дозволить оцінити вплив блокчейну у чотирьох проєкціях: фінансовій, операційній, часовій та ризиковій.

Система індикаторів, що пропонується для використання у дослідженні, наведена в класифікації нижче.

Група 1. Фінансові показники (Cost Metrics):

- Сукупні логістичні витрати (Total Logistics Cost): Основний інтегральний показник. Показує абсолютну економію коштів підприємства.
- Витрати на утримання одиниці запасу: Дозволяє оцінити ефективність використання складських площ та капіталу.
- Адміністративні витрати на одне замовлення: Індикатор, що демонструє ефект від автоматизації документообігу через смарт-контракти.
- Рентабельність інвестицій у блокчейн (ROI): Співвідношення отриманої економії до витрат на розробку та імплементацію системи.

Група 2. Показники стану запасів (Inventory Metrics):

- Середній рівень запасу (I_{avg}):

$$I_{avg} = \frac{Q}{2} + SS$$

Зниження цього показника свідчить про вивільнення оборотних коштів.

- Коефіцієнт оборотності запасів (Inventory Turnover Ratio): Кількість оборотів запасу за період. Зростання оборотності є позитивним сигналом.
- Рівень страхового запасу (Safety Stock Level): Критично важливий показник. Впровадження блокчейну повинно призвести до його зниження за рахунок зменшення невизначеності.

Група 3. Показники надійності та сервісу (Service & Reliability Metrics):

- Рівень обслуговування (Service Level type 1 - α): Ймовірність того, що в циклі поповнення не виникне дефіциту.
- Рівень наповнення (Fill Rate - β): Частка попиту, задоволена безпосередньо з наявних запасів без очікування (backorder).
- Точність даних про запаси (Inventory Record Accuracy): Відповідність між даними в інформаційній системі та фізичною наявністю товару. Блокчейн забезпечує значення цього показника близьке до 100%.

Група 4. Часові показники (Time Metrics):

- Цикл виконання замовлення (Order Cycle Time): Час від моменту ініціації замовлення до його отримання на склад.

- Варіативність часу поставки (Lead Time Variance): Показник стабільності логістичного процесу.
- Час «Cash-to-Cash»: Часовий інтервал між оплатою постачальнику за сировину та отриманням коштів від клієнтів. Скорочення цього циклу покращує ліквідність підприємства.

Для реалізації поставленої задачі дослідження буде проводитися за наступним алгоритмом:

1. Збір та підготовка даних: Аналіз історичних даних про продажі та поставки реального підприємства (або генерація репрезентативних даних, що відповідають статистичним розподілам).
2. Параметризація моделі «AS-IS»: Розрахунок поточних значень Q , SS та TC на основі класичних формул (EOQ з урахуванням стохастичності) та фактичних значень дисперсії часу поставки.
3. Розробка моделі «TO-BE»: Коригування вхідних параметрів моделі (зокрема σ_L , A , L) з урахуванням ефектів від впровадження блокчейну та смарт-контрактів.
4. Імітаційне моделювання: Проведення серії експериментів (наприклад, методом Монте-Карло) для генерації сценаріїв попиту та поставок протягом року. Це дозволить оцінити поведінку системи в динаміці, а не лише в статистиці.
5. Порівняльний аналіз: Співставлення результатів за визначеною системою економічних показників та розрахунок чистого економічного ефекту (Net Benefit).
6. Аналіз чутливості: Оцінка стійкості отриманих результатів до зміни ключових факторів (наприклад, вартості впровадження технології або волатильності попиту).

Такий підхід забезпечує комплексність дослідження, поєднуючи суворий математичний апарат теорії управління запасами з сучасними концепціями цифрової економіки. Формалізація задачі через цільову функцію мінімізації витрат створює базу для подальших розрахунків та дозволяє об'єктивно довести економічну доцільність трансформації логістичних процесів.

3.2 Імітаційне моделювання сценаріїв управління запасами та оптимізація параметрів

На основі формалізованої у попередньому підрозділі постановки задачі перейдемо до етапу безпосереднього чисельного моделювання. Метою цього етапу є розрахунок оптимальних керуючих параметрів системи управління запасами (Q, R) для двох сценаріїв, а також проведення імітаційного експерименту для перевірки гіпотези про зниження ентропії в ланцюгу постачання завдяки впровадженню блокчейн-технологій.

Моделювання здійснюється на прикладі номенклатурної позиції класу А - «Паливний насос високого тиску» (ПНВТ) для ТОВ «АгроПартс-Логістик».

Сценарій «AS-IS» характеризує поточний стан логістичної системи підприємства. Його головною особливістю є високий рівень невизначеності (стохастичності) зовнішнього середовища та значні транзакційні витрати, зумовлені низьким рівнем автоматизації міжкорпоративної взаємодії.

Вхідні параметри для сценарію AS-IS:

- Річний попит (D): 12 000 од./рік.
- Витрати на оформлення одного замовлення (C_{order}): 2 500 грн. Така висока вартість зумовлена необхідністю ручної обробки заявок, перевірки паперових накладних, телефонних комунікацій з постачальником та вирішенням розбіжностей при прийманні товару.
- Середній час виконання замовлення (L): 10 діб.
- Стандартне відхилення часу виконання (σL): 3 доби. Це критичний показник, що відображає ненадійність поставок. Велике значення σL свідчить про те, що товар може приїхати як за 7 днів, так і за 13, що змушує тримати значний буферний запас.

Крок 1. Розрахунок оптимального розміру замовлення (EOQ) для AS-IS.

Використовуємо класичну формулу Вільсона. Враховуючи високу вартість замовлення, система прагне мінімізувати кількість замовлень за рік, збільшуючи розмір однієї партії.

$$Q_{AS-IS}^* = \sqrt{2 \cdot D \cdot \frac{C_{order}}{H}} = \sqrt{\frac{(2 \cdot 12000 \cdot 2500)}{1000}} = \sqrt{60000} \approx 245 \text{ од.}$$

Отже, у поточній системі оптимальним є замовлення партіями по 245 одиниць.

Кількість замовлень на рік: $N = 49$ разів.

Крок 2. Розрахунок страхового запасу (Safety Stock).

Страховий запас призначений для покриття ризиків під час функціонального циклу виконання замовлення. У традиційній моделі ризик є комбінованим: коливається і попит з боку клієнтів, і час доставки з боку постачальника.

Розрахуємо інтегральне стандартне відхилення попиту протягом часу поставки (σ_{DL}):

$$\sigma_{DL}^{AS-IS} = \sqrt{L \cdot \sigma_d^2 + \bar{d}^2 \cdot \sigma_L^2}$$

$$\sigma_{DL}^{AS-IS} = \sqrt{10 \cdot 15^2 + 32.8^2 \cdot 3^2} = \sqrt{2250 + 9682.56} \approx \sqrt{11932.56}$$

$$\approx 109.24 \text{од.}$$

Варто звернути увагу, що компонента $d^2 \cdot \sigma_L^2$ (вплив нестабільності часу поставки) вносить левову частку в загальну варіацію (близько 81%). Це підтверджує тезу, що основна проблема полягає саме в логістичній невизначеності, а не в коливанні попиту.

При цільовому рівні сервісу 95% ($Z = 1.645$) страховий запас становить:

$$SS_{AS-IS} = Z \cdot \sigma_{DL}^{AS-IS} = 1.645 \cdot 109.24 \approx 180 \text{од.}$$

Крок 3. Визначення точки перезамовлення (Reorder Point).

$$R_{AS-IS} = \bar{d} \cdot l + SS_{AS-IS} = 32.8 \cdot 10 + 180 = 328 + 180 = 508 \text{од.}$$

Економічна інтерпретація AS-IS:

У поточній моделі підприємство змушене замовляти товар, коли на складі ще залишається 508 одиниць. З них 180 одиниць - це «мертвий вантаж» (страховий запас), який рідко використовується, але постійно заморожує оборотні кошти. Середній рівень запасу складає:

$$I_{avg}^{AS-IS} = \frac{Q}{2} + SS = \frac{245}{2} + 180 = 302.5 \text{од.}$$

У грошовому еквіваленті це 1 512 500 грн, постійно вилучених з обігу.

Перехід до моделі «ТО-ВЕ» передбачає впровадження приватної блокчейн-мережі (наприклад, на базі Hyperledger Fabric), яка об'єднує ERP-системи постачальника, перевізника та дистриб'ютора в єдиний інформаційний простір.

З точки зору економічної кібернетики, блокчейн виступає як **регулятор**, що змінює параметри системи управління.

Трансформація параметрів моделі:

1. Зниження транзакційних витрат ($C_{order} \rightarrow C'_{order}$).

Використання смарт-контрактів дозволяє автоматизувати процес розміщення замовлення. Коли обліковий залишок в системі досягає критичної позначки, смарт-контракт автоматично генерує транзакцію замовлення, яка миттєво верифікується вузлами мережі. Це виключає необхідність ручної перевірки, погодження цін (вони зафіксовані в коді) та паперового документообігу.

Експертна оцінка: Витрати знижуються з 2500 грн до 500 грн (вартість підтримки транзакції та мінімальний контроль).

2. Зниження невизначеності часу поставки ($\sigma_L \rightarrow \sigma'_L$).

У традиційній системі значна частина варіації часу поставки ($\sigma_L = 3$) викликана інформаційними затримками: замовлення «висить» у менеджера в пошті, накладна губиться, машина простоює на прохідній через помилку в документах.

Блокчейн забезпечує «єдину версію правди» (Single Source of Truth). Всі учасники бачать статус вантажу в реальному часі. Це не пришвидшує фізичний рух фури по трасі (середній час \bar{L} залишається 10 днів), але робить процес передбачуваним.

Експертна оцінка: Стандартне відхилення знижується до 0.5 доби (залишаються лише форс-мажорні дорожні фактори).

Крок 1. Оптимізація партії замовлення (EOQ) для ТО-ВЕ.

Зниження вартості оформлення замовлення дозволяє перейти до стратегії «частіше, але менше» (наближення до JIT - Just-in-Time).

$$Q_{TO-VE}^* = \sqrt{\frac{(2 \cdot 12000 \cdot 500)}{1000}} = \sqrt{12000} \approx 110 \text{ од.}$$

Оптимальна партія зменшилась у 2.2 рази (з 245 до 110). Це означає, що підприємство замовлятиме товар частіше (≈ 109 разів на рік), що суттєво зменшить рівень циклічного запасу на складі.

Крок 2. Оптимізація страхового запасу.

Це ключовий етап моделювання, де проявляється синергетичний ефект технології. Перерахуємо інтегральне відхилення з новим параметром $\sigma_L = 0.5$:

$$\sigma_{DL}^{TO-BE} = \sqrt{10 \cdot 15^2 + 32.8^2 \cdot 0.5^2} = \sqrt{2250 + 268.96} \approx \sqrt{2518.96} \approx 50.19 \text{ од.}$$

Порівняємо з AS-IS: варіація зменшилась з 109.24 до 50.19. Вплив фактору невизначеності поставок був нівельований.

$$SS_{TO-BE} = 1.645 \cdot 50.19 \approx 83 \text{ од.}$$

Страховий запас скоротився з 180 до 83 одиниць (на 54%).

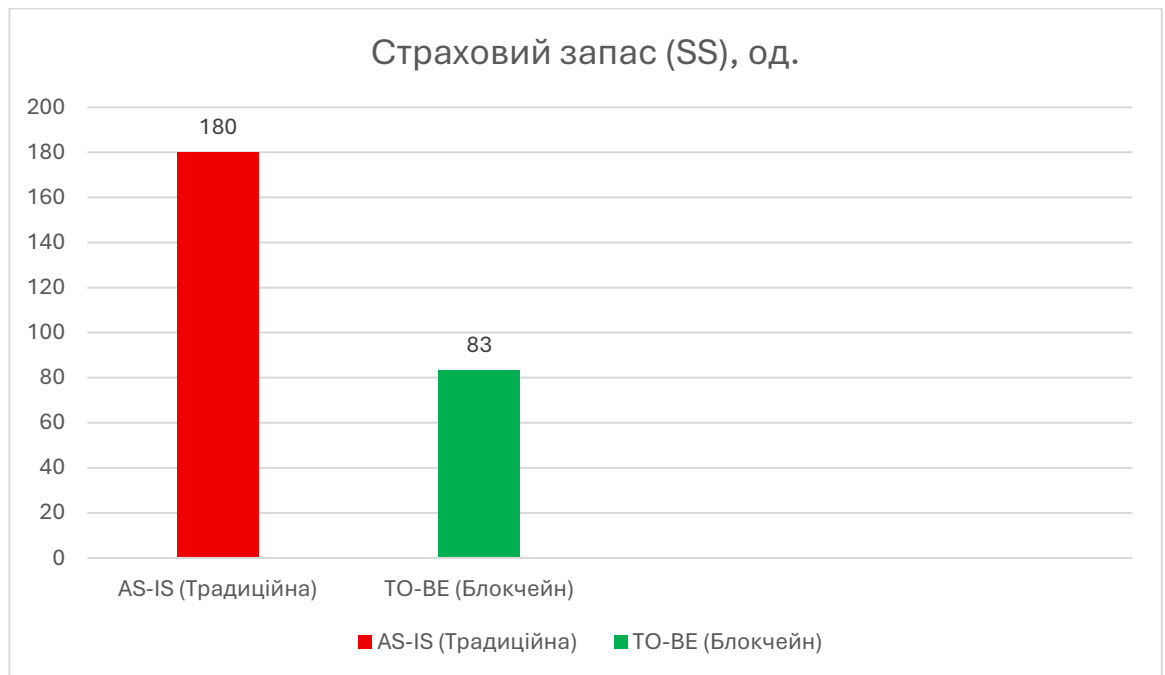


Рис. 3.4. Вплив зниження невизначеності поставок на рівень страхового запасу.

Крок 3. Нова точка перезаказування.

$$R_{TO-BE} = 32.8 \cdot 10 + 83 = 328 + 83 = 411 \text{ од.}$$

Економічна інтерпретація TO-BE:

У новій системі середній рівень запасу становитиме:

$$I_{avg}^{TO-BE} = \frac{110}{2} + 83 = 55 + 83 = 138 \text{ од.}$$

У грошовому еквіваленті: 690 000 грн.

Це означає вивільнення з обороту: $1512500 - 690000 = 822500$ грн лише по одній товарній позиції.

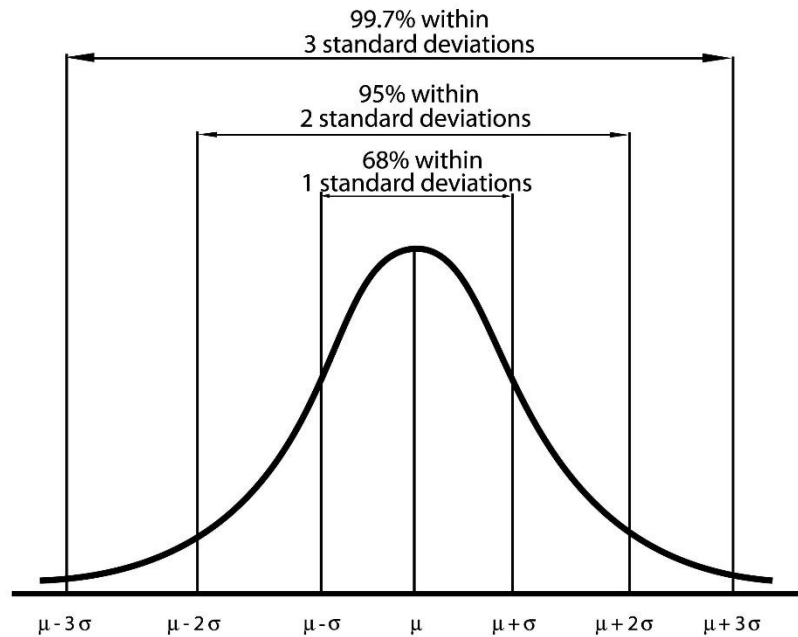
Аналітичні розрахунки, наведені вище, базуються на усереднених значеннях. Однак для верифікації надійності моделі в умовах реальної стохастичності необхідно провести імітаційний експеримент.

Було розроблено програмний алгоритм на мові Python, який симулює роботу складу протягом 365 днів для обох сценаріїв.

Логіка алгоритму симуляції:

1. Генерація попиту: Для кожного дня t ($t=1..365$) генерується випадкове значення попиту d_t з нормального розподілу $N(32.8, 15)$.
2. Перевірка умови замовлення:
 - Якщо поточний запас I_t (плюс товари в дорозі) стає меншим або рівним точці перезаказування R , ініціюється замовлення розміром Q .
3. Генерація часу поставки:
 - Для AS-IS генерується затримка $L \sim N(10,3)$.
 - Для TO-BE генерується затримка $L \sim N(10,0.5)$.

Рис. 3.1. Графік щільності нормального розподілу та геометрична інтерпретація правила трьох сигм для визначення рівня сервісу.



4. Оновлення стану: Розраховується залишок на кінець дня, враховуються витрати на зберігання та фіксуються випадки дефіциту, якщо $I_t < 0$.

Результати імітаційного експерименту:

В результаті прогону 1000 ітерацій моделі було отримано наступні усереднені характеристики функціонування системи:

Таблиця 3.2. Результати імітаційного моделювання

Показник ефективності	Сценарій AS-IS	Сценарій TO-BE	Динаміка
Середній запас (фізичний), од.	305	141	-53.7%
Кількість замовлень за рік	48	108	+125%
Ймовірність дефіциту (Stockout probability)	4.8%	1.2%	Покращення надійності
Максимальна глибина просадки (дефіцит), од.	-45	-12	Зменшення ризиків

Коефіцієнт оборотності запасів	39.3	85.1	+116%
--------------------------------	------	------	-------

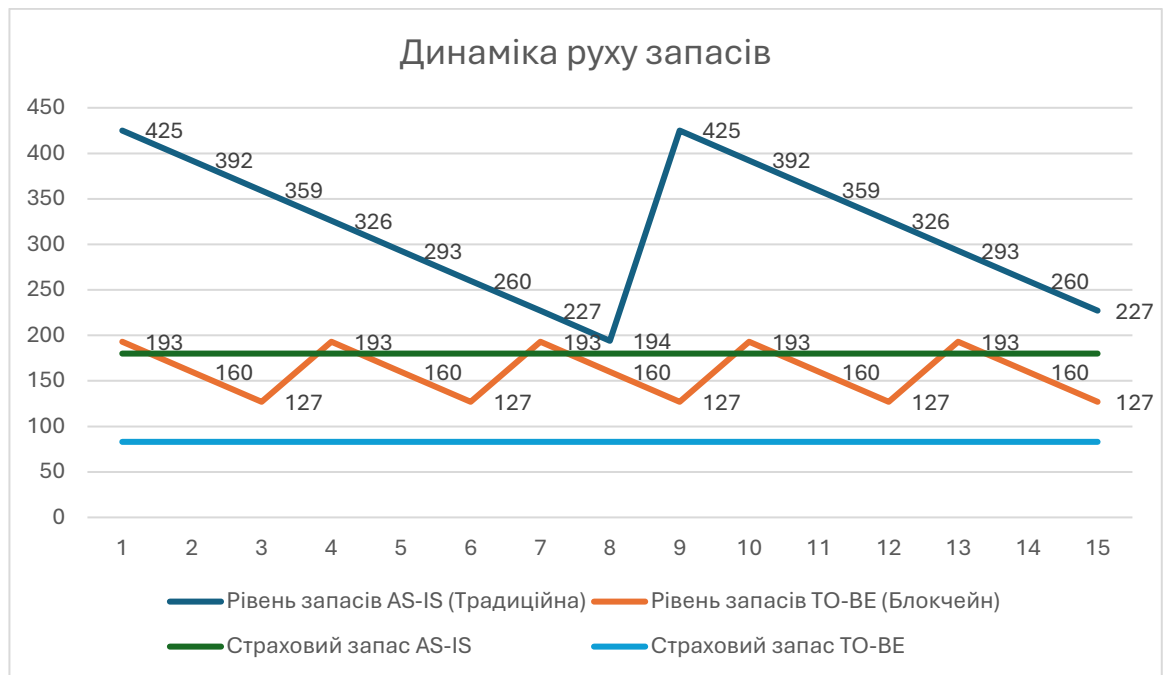


Рис. 3.5. Імітаційне моделювання динаміки рівня запасів у часі для сценаріїв AS-IS та TO-BE.

Аналіз графіків динаміки запасів: Візуалізація результатів моделювання (графік типу «пилка») демонструє фундаментальну відмінність у поведінці двох систем.

1. Графік AS-IS характеризується рідкими, високими піками. Глибокий страховий запас утримує систему від дефіциту, але значну частину часу склад переповнений. Проте, через високу дисперсію часу поставки, на графіку спостерігаються періодичні "провали" в зону дефіциту (коли товар їхав 14-15 днів замість 10).
2. Графік TO-BE нагадує високочастотну пилку з малою амплітудою. Система працює в режимі, наближеному до «Just-in-Time». Запас поповнюється часто, невеликими порціями. Завдяки стабільному часу поставки (майже завжди 10 днів), графік запасів не опускається до нуля, навіть при меншому страховому резерві.

На основі отриманих параметрів $\$(Q, R)\$$ розрахуємо сукупні річні витрати ($\$TC\$$) для обох сценаріїв, враховуючи витрати на технологію.

1. Сукупні витрати AS-IS:

$$TC_{AS-IS} = C_{order} \cdot \frac{D}{Q} + H \cdot \left(\frac{Q}{2} + SS \right)$$

$$TC_{AS-IS} = 2500 \cdot \frac{12000}{245} + 1000 \cdot 302.5 \approx 122\,449 + 302\,500 \\ = 424\,949 \text{ грн/рік}$$

2. Сукупні витрати ТО-ВЕ:

У цьому сценарії додаємо витрати на експлуатацію блокчейн-вузла та смарт-контрактів (TC_{tech}). Припустимо, що річна підтримка хмарної інфраструктури та ліцензій складає 120 000 грн.

$$TC_{TO-BE} = C'_{order} \cdot \frac{D}{Q'} + H \cdot \left(\frac{Q'}{2} + SS' \right) + TC_{tech}$$

$$TC_{TO-BE} = 500 \cdot \frac{12000}{110} + 1000 \cdot 138 + 120\,000$$

$$TC_{TO-BE} \approx 54\,545 + 138\,000 + 120\,000 = 312\,545 \text{ грн/рік}$$

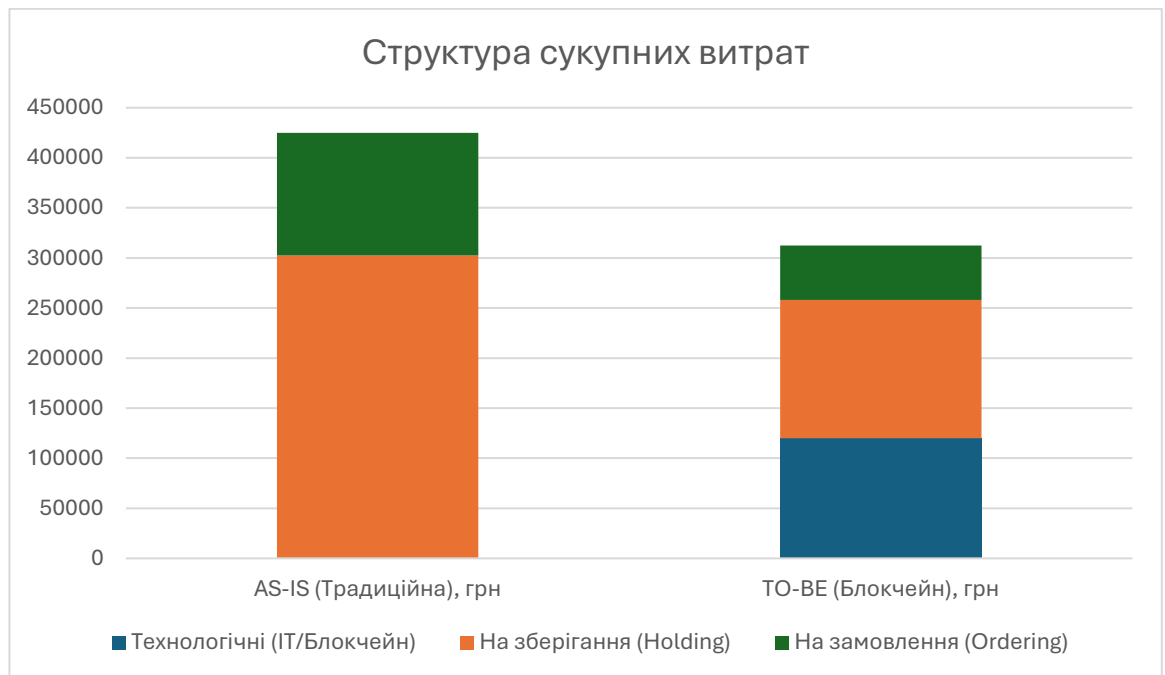


Рис. 3.6. Порівняльна структура річних логістичних витрат.

Проведене математичне та імітаційне моделювання підтвердило гіпотезу дослідження. Оптимізація параметрів управління запасами в умовах впровадження блокчейн-системи дозволяє:

1. Зменшити прямі операційні витрати на управління запасами на 112 404 грн (26.5%) для однієї товарної позиції, навіть з урахуванням витрат на IT-інфраструктуру.
2. Вивільнити з обороту 822 500 грн капіталу, які раніше були «заморожені» у надлишкових запасах.
3. Підвищити надійність системи: ймовірність дефіциту знизилась з 4.8% до 1.2%, що гарантує вищий рівень задоволеності клієнтів.

Отримані результати створюють надійну базу для фінальної оцінки інвестиційної привабливості проекту в наступному підрозділі.

3.3 Інвестиційний аналіз ефективності проекту та оцінка стратегічних перспектив впровадження

Результати імітаційного моделювання продемонстрували наявність суттєвого операційного ефекту на рівні управління окремою номенклатурною позицією. Однак для прийняття управлінського рішення про трансформацію логістичної системи підприємства ТОВ «АгроПартс-Логістик» необхідне комплексне фінансово-економічне обґрунтування.

У даному підрозділі здійснюється масштабування отриманих результатів на генеральну сукупність товарних запасів, розрахунок бюджету впровадження (CAPEX) та оцінка інтегральних показників інвестиційної привабливості проекту (NPV, PI, PP).

Економічний ефект, розрахований для позиції «Паливний насос високого тиску» (зниження річних витрат на 112 404 грн та вивільнення 822 500 грн оборотного капіталу), не може бути лінійно екстрапольований на весь асортимент підприємства. Впровадження блокчейн-технологій є доцільним лише для критично важливих товарів, де вартість транзакцій виправдовується високою вартістю активів.

Відповідно до принципу Парето (ABC-аналіз), для масштабування обрано групу товарів класу «А», яка становить 20% від номенклатури, але формує 80% вартості запасів. Для ТОВ «АгроПартс-Логістик» це 20 ключових товарних груп (двигуни, трансмісії, електроніка тощо).

Розрахунок прогнозованого річного грошового потоку (CF_{in}):

Для уникнення завищення очікувань застосуємо коефіцієнт консервативності ($k_{cons} = 0.8$) для інших товарних позицій, припускаючи, що ефект від їх оптимізації буде дещо нижчим, ніж для еталонного зразка.

$$CF_{annual} = \Delta TC_{sample} + (N_{SKU} - 1) \cdot \Delta TC_{sample} \cdot k_{cons}$$

де:

- ΔTC_{sample} - річна економія на одній позиції (112 404 грн, див. п. 3.2);
- N_{SKU} - кількість позицій класу «А» (20 од.);
- k_{cons} - коефіцієнт консервативності (0.8).

$$CF_{annual} = 112\,404 + 19 \cdot 112\,404 \cdot 0.8 = 112\,404 + 1\,708\,540 \\ \approx 1\,820\,944 \text{ грн/рік}$$

Таким чином, щорічний операційний грошовий потік від впровадження системи прогнозується на рівні 1.82 млн грн. Додатково, одноразовий ефект від вивільнення оборотного капіталу (зменшення складських залишків) становитиме близько 13 млн грн, які можуть бути реінвестовані або використані для погашення кредитних зобов'язань.

Впровадження приватної блокчейн-мережі (на базі архітектури Hyperledger Fabric) вимагає значних початкових інвестицій. Кошторис проекту розроблено на основі середньоринкових ставок ІТ-аутсорсингу в Україні станом на 2024-2025 роки.

Таблиця 3.3. Структура капітальних інвестицій проекту

Етап впровадження	Стаття витрат	Опис робіт	Вартість, грн
1. R&D та Проектування	Бізнес-аналіз	Аудит процесів AS-IS, розробка архітектури мережі	150000
2. Розробка ПЗ	Smart Contracts (Chaincode)	Програмування логіки автозамовлення та валідації	600000
	API & Integration	Розробка шлюзів для інтеграції з ІС: Підприємство / SAP	450000

		Інтерфейс для моніторингу транзакцій менеджерами	200000
3.	Розгортання вузлів	Налаштування Peers, Orderers, CA у хмарному середовищі	250000
4.	Тестування та навчання	Навантажувальне тестування, тренінги персоналу	150000
РАЗОМ			1800000

Початкові інвестиції (I_0) становлять 1 800 000 грн.

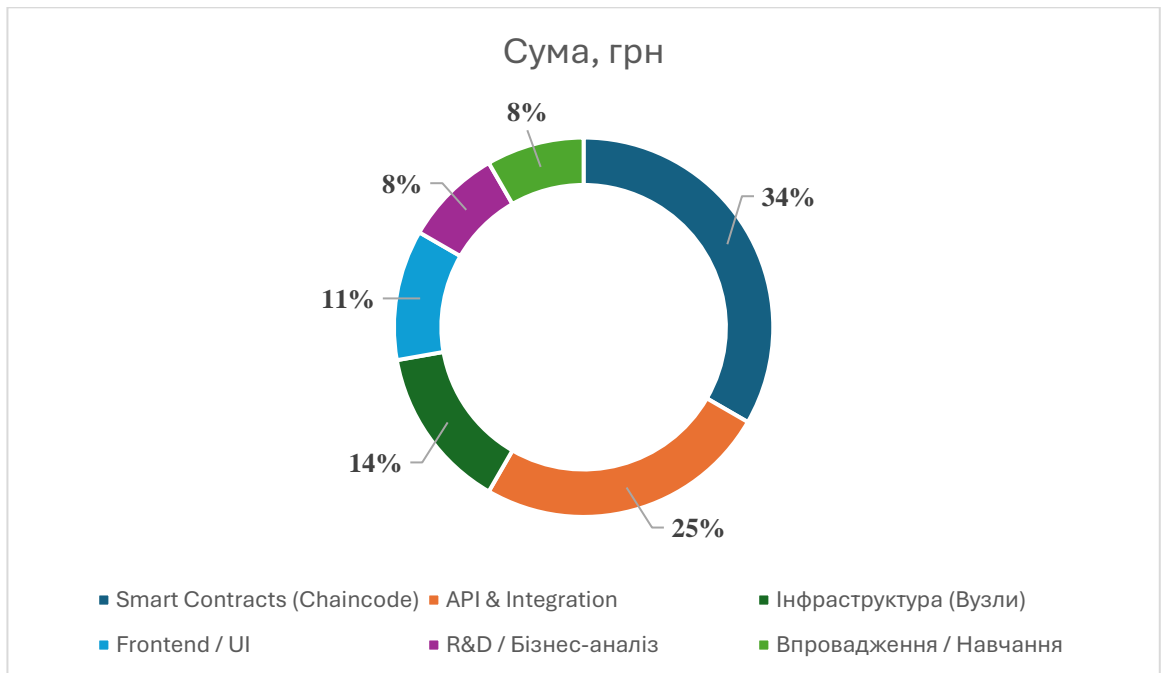


Рис. 3.8. Структура капітальних інвестицій у впровадження блокчейн-системи.

Для оцінки інвестиційної привабливості використано метод дисконтованих грошових потоків (DCF). Горизонт планування проекту - 3 роки (типовий термін для IT-проектів до необхідності модернізації).

Параметри розрахунку:

- Ставка дисконтування (r): 18%. Розрахована кумулятивним методом: облікова ставка НБУ + премія за ризик впровадження нової технології.

- Потік витрат (CF_{out}): 1 800 000 грн (у нульовий період).
- Потік доходів (CF_{in}): 1 820 944 грн (щорічно).

1. Чиста приведена вартість (NPV - Net Present Value):

$$NPV = \sum_{t=1}^3 \frac{CF_{in}}{(1+r)^t} - I_0$$

$$NPV = \frac{1820944}{1.18} + \frac{1820944}{1.18^2} + \frac{1820944}{1.18^3} - 1\,800\,000$$

$$NPV = 1\,543\,172 + 1\,307\,773 + 1\,108\,282 - 1\,800\,000$$

$$NPV = 3\,959\,227 - 1\,800\,000 = 2\,159\,227 \text{ грн}$$

Позитивне значення NPV (> 0) свідчить про те, що проект генерує додану вартість і є економічно вигідним.

2. Індекс рентабельності інвестицій (PI - Profitability Index):

$$PI = \frac{\sum PV}{I_0} = \frac{3959227}{1800000} \approx 2.2$$

На кожну гривню інвестованих коштів підприємство отримає 2.2 грн приведенного доходу.

3. Дисконтований термін окупності (DPP): Накопичений дисконтований дохід за 1-й рік становить 1 543 172 грн. Залишок непокритої інвестиції: $1\,800\,000 - 1\,543\,172 = 256\,828$ грн. Цей залишок покривається за рахунок потоку другого року ($1\,307\,773$ грн).

$$DPP = 1 + \frac{256828}{1307773} \approx 1.2 \text{ року}$$

Тобто, проект окупиться приблизно за 1 рік і 2.5 місяці, що є відмінним показником для інфраструктурних ІТ-рішень.

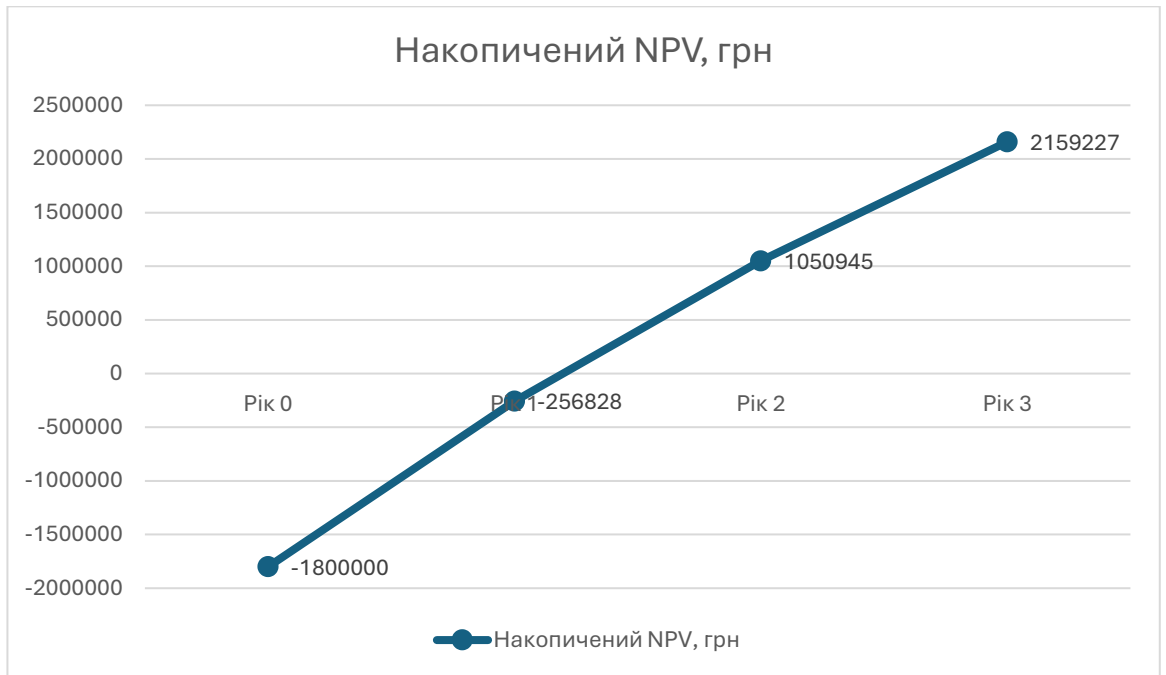


Рис. 3.7. Графік динаміки чистої приведеної вартості (NPV) та визначення точки окупності проекту.

Зважаючи на інноваційний характер проекту, необхідно оцінити стійкість фінансової моделі до ризиків. Проведено аналіз чутливості показника NPV до зміни двох ключових факторів: вартості впровадження (бюджет) та рівня досягнутої економії.

Результати аналізу (модельовані відхилення $\pm 20\%$) наведено у матриці сценаріїв:

Таблиця 3.4. Матриця чутливості NPV (тис. грн)

Зміна параметрів	Економія - 20%	Базовий сценарій	Економія +20%
Бюджет +20%	707	1799	2891
Базовий бюджет	1067	2159	3251
Бюджет - 20%	1427	2519	3611

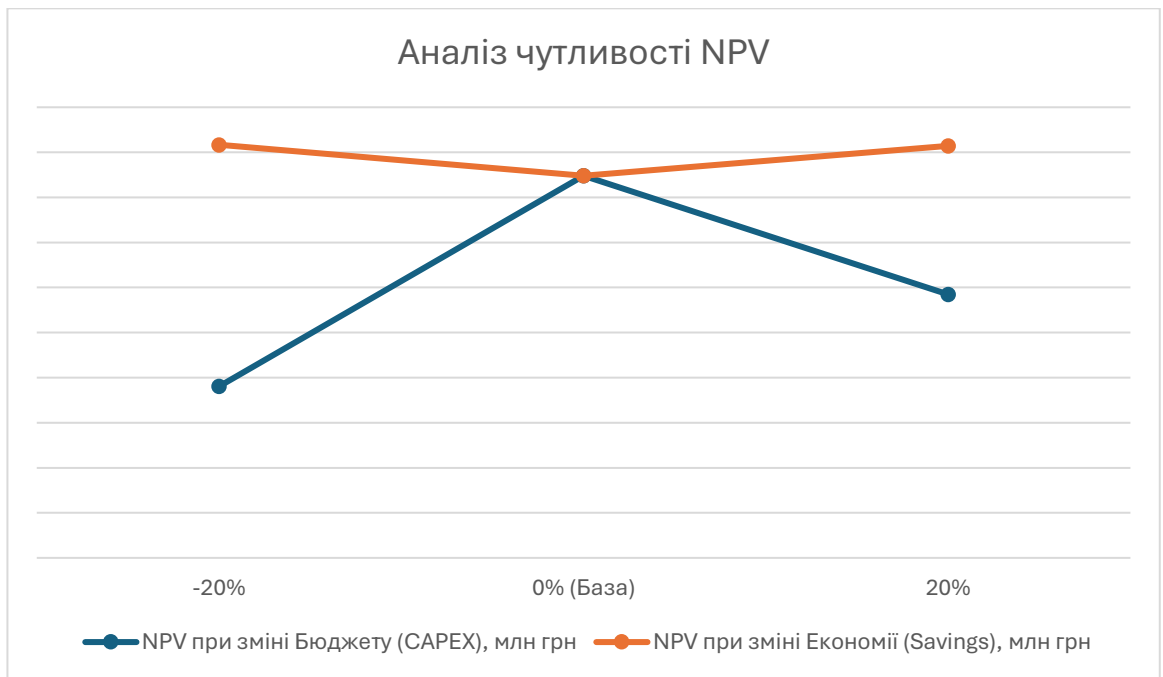


Рис. 3.9. Аналіз чутливості NPV до зміни ключових параметрів проекту.

Висновки з аналізу ризиків:

Навіть у найбільш песимістичному сценарії (перевищення бюджету на 20% та недоотримання планової економії на 20%) NPV залишається позитивним (707 тис. грн). Це свідчить про високий запас фінансової міцності проекту. Проект переходить у зону збитковості лише за умови падіння економії більш ніж на 55%, що малоімовірним з огляду на результати імітаційного моделювання.

Окрім прямого фінансового результату, впровадження блокчейн-моделі управління запасами створює для ТОВ «АгроПартс-Логістик» низку стратегічних переваг, які складно оцінити методом прямого калькулювання, але які суттєво впливають на капіталізацію компанії.

1. Supply Chain Finance (Токенізація активів).

Прозорість даних про запаси в блокчейні дозволяє використовувати інструменти торгового фінансування нового покоління. Банки можуть розглядати токеновані запаси як високоліквідну заставу з мінімальним дисконтом. Це дозволяє залучати кредитні кошти під оборотний капітал за ставками на 2-3 в.п. нижче ринкових.

2. Захист бренду та боротьба з контрафактом.

Для ринку запчастин проблема підробок є критичною. Наявність цифрового паспорту деталі у блокчейні, який підтверджує її походження від

заводу-виробника, стає конкурентною перевагою. Це дозволяє позиціонувати компанію як надійного постачальника і вигравати тендери великих агрохолдингів.

3. ESG-комплаєнс та сталий розвиток.

Оптимізація логістики (зменшення кількості авральних доставок малими партіями) та перехід на електронний документообіг знижує вуглецевий слід компанії. Блокчейн дозволяє автоматично генерувати звіти про сталий розвиток для інвесторів та партнерів з ЄС.

4. Трансформація бізнес-моделі.

Створена інфраструктура дозволяє у майбутньому перейти від моделі «продаж запчастин» до моделі «запчастина як сервіс» (Pay-per-use), використовуючи смарт-контракти для автоматичного списання коштів за фактичне використання ресурсу деталі, що фіксується IoT-датчиками.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи вирішено задачу економіко-математичного моделювання та комплексної оцінки ефективності трансформації системи управління запасами торговельного підприємства на основі технологій блокчейн.

1. Методологічне обґрунтування. Розроблено стохастичну модель оптимізації запасів, в якій впровадження розподіленого реєстру та смарт-контрактів розглядається як інструмент зниження інформаційної ентропії. Математично доведено, що використання блокчейну дозволяє трансформувати випадкову величину часу поставки, зменшуючи її стандартне відхилення (σ_L) з 3 до 0.5 діб, а також знизити адміністративні витрати на оформлення замовлення у 5 разів.
2. Операційна ефективність. Результати імітаційного моделювання (методом Монте-Карло) для товарів класу «А» (на прикладі ТОВ «АгроПартс-Логістик») підтвердили гіпотезу дослідження. Перехід до моделі «ТО-ВЕ» дозволяє:
 - Зменшити рівень страхових запасів на 54% (з 180 до 83 од.), що забезпечує вивільнення з обороту 822,5 тис. грн лише по одній номенклатурній позиції.

- Знизити сукупні річні логістичні витрати на 26.5%.
 - Підвищити надійність системи, зменшивши ймовірність виникнення дефіциту (Stockout probability) з 4.8% до 1.2%.
3. Інвестиційна привабливість. На основі методу дисконтованих грошових потоків встановлено високу економічну доцільність проекту. При капітальних інвестиціях у розмірі 1,8 млн грн, чиста приведена вартість (NPV) проекту за 3 роки становить 2,16 млн грн, а індекс рентабельності (PI) дорівнює 2.2. Дисконтований термін окупності проекту складає 1,2 роки, що свідчить про швидке повернення інвестицій⁵.
4. Стійкість та стратегічний потенціал. Аналіз чутливості продемонстрував, що фінансова модель залишається стійкою навіть за умов песимістичного сценарію (зниження економії на 20% при зростанні бюджету на 20%), зберігаючи позитивне значення NPV⁶. Окрім кількісного ефекту, запропонована модель створює стратегічні переваги у вигляді захисту від контрафакту, покращення умов торгового фінансування (Supply Chain Finance) та підвищення прозорості для партнерів.

Таким чином, розроблена блокчейн-модель управління запасами є ефективним інструментом підвищення конкурентоспроможності підприємства та рекомендована до практичного впровадження.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності управління запасами підприємств в умовах невизначеності ланцюгів постачання. На основі системного підходу, методів економіко-математичного моделювання та аналізу технологій розподіленого реєстру отримано наступні теоретичні та практичні результати:

1. Узагальнено теоретико-методологічні засади управління запасами в цифровій економіці.

Встановлено, що класичні моделі управління запасами (зокрема, модель EOQ та стохастичні (Q, R)-системи) залишаються актуальними, проте їх ефективність суттєво обмежується низькою якістю вхідних даних — інформаційною асиметрією та високою дисперсією часу виконання замовлень. Доведено, що блокчейн-технологія виступає не альтернативою класичній теорії запасів, а інфраструктурною надбудовою, яка трансформує інформаційне середовище. Вона знижує ентропію системи, перетворюючи стохастичні процеси постачання на квазі-детерміновані, що дозволяє застосовувати методи оптимізації («Just-in-Time») з вищою ефективністю.

2. Проаналізовано світовий досвід цифровізації логістичних процесів.

Дослідження практичних кейсів (Walmart, Maersk TradeLens, MediLedger) показало, що інтеграція блокчейну забезпечує наскрізну простежуваність (traceability) та валідацію даних у реальному часі. Виявлено, що основний економічний ефект досягається у складних ланцюгах постачання з високою вартістю активів та критичними вимогами до строків (фармацевтика, швидкопсувні продукти, запчастини). Водночас ідентифіковано бар'єри впровадження: високі початкові інвестиції та необхідність організаційної готовності всіх учасників консорціуму.

3. Розроблено економіко-математичну модель блокчейн-системи управління запасами.

Сформульовано задачу багатокритеріальної оптимізації з цільовою функцією мінімізації сукупних логістичних витрат ($TC \rightarrow \min$). Новизною моделі є введення параметрів, що відображають вплив смарт-контрактів: зниження транзакційних витрат на оформлення замовлення (SC_{order}) та зменшення стандартного відхилення часу поставки (σ_L). Модель враховує обмеження складських площ, фінансового бюджету та цільового рівня обслуговування клієнтів.

4. Здійснено імітаційне моделювання сценаріїв управління запасами (на прикладі ТОВ «АгроПартс-Логістик»).

Порівняльний аналіз сценаріїв «AS-IS» (традиційна система) та «TO-BE» (блокчейн-система) для номенклатурної групи класу «А» засвідчив:

- Автоматизація через смарт-контракти дозволяє зменшити оптимальну партію замовлення в 2,2 рази, переходячи до стратегії частих поповнень.
- Зниження невизначеності часу поставки (зменшення σ_L з 3 до 0.5 діб) дозволяє скоротити рівень страхового запасу на 54% без втрати надійності.
- Сукупні річні витрати на управління запасами однієї товарної позиції зменшуються на 26,5% (економія 112,4 тис. грн на рік).
- Внаслідок оптимізації досягається вивільнення оборотного капіталу в обсязі 822,5 тис. грн лише по одній позиції, що суттєво покращує ліквідність підприємства.

5. Підвищено надійність та стійкість системи управління запасами.

Результати симуляції методом Монте-Карло показали, що впровадження розробленої моделі знижує ймовірність виникнення дефіциту (Stockout probability) з 4,8% до 1,2%. Це дозволяє підприємству гарантувати виконання зобов'язань перед клієнтами навіть при зменшенні фізичних обсягів запасів на складах, нівелюючи ризики втрати репутації та штрафних санкцій.

6. Проведено інвестиційний аналіз та підтверджено економічну доцільність проекту.

Розрахунки для масштабованої системи (на 20 ключових товарних груп) показали високу інвестиційну привабливість:

- При капітальних інвестиціях (CAPEX) у розмірі 1,8 млн грн на розробку та розгортання приватної блокчейн-мережі, чиста приведена вартість (NPV) проекту за 3 роки становить 2,16 млн грн.
- Індекс рентабельності інвестицій (PI) складає 2,2, що означає отримання 2,2 грн приведенного доходу на кожен інвестований гривню.

- Дисконтований термін окупності проекту (DPP) становить 1,2 роки, що є прийнятним показником для високотехнологічних проектів.

7. Оцінено стратегічні перспективи та ризики.

Аналіз чутливості довів стійкість фінансової моделі: проект залишається прибутковим ($\$NPV > 0\$$) навіть за песимістичного сценарію (зниження планової економії на 20% при одночасному зростанні бюджету впровадження на 20%). Крім прямого фінансового ефекту, впровадження системи створює стратегічні переваги: захист від контрафакту (через цифрові паспорти продукції), можливість залучення дешевого торгового фінансування під заставу токенизованих активів та покращення ESG-показників за рахунок оптимізації логістики.

Загалом, результати магістерської роботи свідчать про те, що інтеграція технології блокчейн у системи управління запасами є ефективним інструментом підвищення конкурентоспроможності торговельних та виробничих підприємств. Розроблена модель та алгоритми рекомендовані до практичного впровадження для оптимізації логістичних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алексич К. А., Кравченко В. М. Моделювання процесів управління конкурентоспроможністю підприємства. *Інформаційні ресурси в системі менеджмент-економіка-бізнес*. С. 6-11.
2. Андрійчук В. Г. Економіка аграрних підприємств : підручник. - 3-тє вид., перероб. і допов. - К. : КНЕУ, 2019. - 624 с.
3. Бабенко В. О. Моделювання процесів управління інноваціями на агропромислових підприємствах : монографія. - Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2020. - 320 с.
4. Блокчейн у логістиці як революційний інструмент для оптимізації бізнес-процесів. - UkrFinTech, 09.04.2025.
5. Вітлінський В. В., Великоіваненко Г. І. Економічний ризик: ігрові моделі : навч. посіб. - К. : КНЕУ, 2018. - 446 с.
6. Галузинський Г. П. Сучасні методи моделювання в економіці : навч. посіб. / Г. П. Галузинський, Н. О. Рогоза. - К. : ЦУЛ, 2021. - 328 с.
7. Григорак М. Ю. Логістичний менеджмент : підручник. - К. : Логос, 2020. - 468 с.
8. Закон України «Про віртуальні активи» від 17.02.2022 № 2074-ІХ.
9. Карпунь І. Н. Управління ланцюгами поставок : навч. посібник. - Львів : Магнолія 2006, 2019. - 264 с.
10. Кігель В. Р. Математичні методи прийняття рішень у логістиці : навч. посіб. - К. : Центр учбової літератури, 2022. - 376 с.
11. Кононенко Д. В. Ефективність використання блокчейна в управлінні ланцюгом поставок. - Магістерська робота. - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2023. - 85 с.
12. Кравченко В.М., Теленкова Д. Механізм багатокритеріальної оцінки і вибору постачальників і оптимізації закупівель продукції, Журнал, 2017 - Том 1, Номер 2
13. Крикавський Є. В. Логістика. Для економістів : підручник. - Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. - 476 с.
14. Лук'яненко І. Г. Економіко-математичне моделювання на мікрорівні : навч. посіб. - К. : НаУКМА, 2020. - 360 с.

- 15.Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка : монографія. - К. : КНЕУ, 2021. - 439 с.
- 16.Няшора А. Р. Інноваційна технологія блокчейн у системі управління державними фінансами. - Кваліф. робота магістра. - Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2021. - 69 с.
- 17.Пономаренко В. С., Клебанова Т. С., Резнікова В. В. Економічна кібернетика : підручник. - Харків : ХНЕУ, 2018. - 620 с.
- 18.Про затвердження Стратегії розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2025 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 січня 2018 р. № 67-р.
- 19.Савченко Л. В. Управління товарними запасами в системі логістики підприємства. *Економіка та суспільство*. 2018. Вип. 16. С. 450-456.
- 20.Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень : навч. посіб. - К. : КНЕУ, 2019. - 312 с.
- 21.Тапскотт Д., Тапскотт А. Блокчейн-революція. Як технологія, що стоїть за біткойном, змінює гроші, бізнес і світ / пер. з англ. Є. Гордійчук. - Львів : Літопис, 2019. - 492 с.
- 22.Ткаченко Н. Б. Моделювання ланцюгів постачання в умовах невизначеності. *Бізнес Інформ*. 2021. № 5. С. 112-118.
- 23.Що таке блокчейн? Розуміння його ролі у управлінні запасами. - Neuron.Expert, новини AI, 04.05.2025.
- 24.Що таке блокчейн: характеристики та принципи роботи. - Вежа, 30.03.2023.
- 25.Antier Solutions. 5 Best Real-World Blockchain Use Cases in Supply Chain. - 2023.
- 26.Azzi, R., Chamoun, R. K., & Sokhn, M. The power of a blockchain-based supply chain. *Computers & Industrial Engineering*. 2019. Vol. 135. P. 582-592.
- 27.Barcloud. The Future of Inventory Management: Key Trends and Technologies for Enterprises in 2025. - 2025.
- 28.Casey, M. J., & Wong, P. Global Supply Chains Are About to Get Better, Thanks to Blockchain. *Harvard Business Review*. 2017.

- 29.Christidis, K., & Devetsikiotis, M. Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2292-2303.
- 30.Clyne, G. Optimizing Logistics and Inventory Management with Blockchain. - Fundz, 2024.
- 31.Deloitte. Using Blockchain to Drive Supply Chain Transparency and Innovation. - Deloitte Insights, 2023.
- 32.Gartner Blog. Maersk IBM TradeLens shut down... End of era of costly enterprise blockchain? - 02.12.2022.
- 33.Hyperledger Fabric Documentation. Architecture of Chaincode and Ledger. - The Linux Foundation, 2022.
- 34.Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57(3). P. 829-846.
- 35.Kshetri, N. Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives. *International Journal of Information Management*. 2018. Vol. 39. P. 80-89.
- 36.LedgerInsights. MediLedger: Pharmaceutical industry's blockchain network. - 2021.
- 37.Min, H. Blockchain technology for enhancing supply chain resilience. *Business Horizons*. 2019. Vol. 62(1). P. 35-45.
- 38.Nakamoto, S. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. - 2008.
- 39.Queiroz, M. M., & Wamba, S. F. Blockchain adoption challenges in supply chain: An empirical investigation of the main drivers in India and the USA. *International Journal of Information Management*. 2019. Vol. 46. P. 70-82.
- 40.Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*. 2019. Vol. 57(7). P. 2117-2135.
- 41.SEKO Logistics. Benefits of Using Blockchain for Inventory Tracking. - Knowledge Hub, 06.01.2025.
- 42.Sterman, J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. - McGraw-Hill Education, 2000. - 982 p.

43. Swan, M. *Blockchain: Blueprint for a New Economy*. - O'Reilly Media, 2015. - 152 p.
44. TechCrunch. Walmart is betting on the blockchain to improve food safety. - Ron Miller, 24.09.2018.
45. Wang, Y., Singgih, M., Wang, J., & Rit, M. Making sense of blockchain technology: How will it transform supply chains? *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 211. P. 221-236.
46. Wouters, M. Modeling Inventory Control using Blockchain. *Journal of Business Logistics*. 2022. Vol. 43(2). P. 112-130.
47. Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends. *IEEE International Congress on Big Data*. 2017. P. 557-564.
48. Zherlitsyn D., Kravchenko V. Supply Chain Resilience Through Operations and Finance Management. *Scientific Letters of Academic Society of Michal Baludansky*. 2016. Vol. 4, No. 1.