МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ
ІНСТИТУТ ім. Ю. М. ПОТЕБНІ
Кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота(проєкт)

магістра
(рівень вищої освіти)

на тему Економічні ефекти впровадження Інтернету речей у бизнес-процеси промислових підприємствах

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.0514-ie
спеціальності 051 Економіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Інформаційна економіка
(назва освітньої програми)
(ініціали та прізвище) Я. Г. Дячук

Керівник проф., д.е.н., проф. Клопов І.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент_____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні
Кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів
Рівень вищої освіти магістр
Спеціальність 051 Економіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Інформаційна економіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)
Дячуку Ярославу Георгійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Економічні ефекти впровадження Інтернету речей у бизнес-процеси промислових підприємствах
керівник роботи Клопов І. О., д.е.н., проф.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ №318-с від «27» лютого 2025 року
Строк подання студентом роботи 01 грудня 2025 р.
2. Вихідні дані до роботи виробничо-фінансові показники діяльності ПрАТ «Запоріжвогнетрив»
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Теоретико-методологічні засади формування економічних ефектів впровадження інтернету речей у бізнес-процеси промислових підприємств. 2. Моделювання впливу інтернету речей на бізнес-процеси та результативність промислових підприємств. 3. Практична реалізація моделей оцінювання економічних ефектів від впровадження інтернету речей у бізнес-процеси промислового підприємства.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Місце технологій Інтернету речей в архітектурі цифрового промислового підприємства. Узагальнена архітектура бізнес-процесів промислового підприємства. Концептуальна схема впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства. Типовий часовий профіль витрат і вигод від цифровізації та впровадження IoT (концепція «J-кривої»). Концептуальна модель оцінювання економічного ефекту IoT-проєктів.

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	професор, д.е.н., в.о. зав. кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Клопов І.О.	17.09	17.09
2	професор, д.е.н., в.о. зав. кафедри кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Клопов І.О.	19.10	19.10
3	професор, д.е.н., в.о. зав. кафедри кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів Клопов І.О.	29.10	29.10

6. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Призначення наукових керівників. Затвердження тем дипломних робіт	*27.02.2025*	
2	Напрацювання теоретичного матеріалу: дослідження сутності об’єкту та предмету дослідження, критичний аналіз існуючих методологічних засад, вибір та обґрунтування напрямку проведення дослідження	*29.10.2025*	
3	Апробація результатів на Міжнародних та Всеукраїнських конференціях	*3.11.2025*	
4	Розробка економіко-математичного забезпечення основних елементів концептуального підходу	*10.11.2025*	
5	Збір та систематизація статистичного та нормативного матеріалу дослідження.	*17.11.2025*	
6	Узагальнення отриманих результатів. Оформлення роботи	*30.11.2025*	
7	Надання роботи до рецензії. Нормоконтроль	*01.12.2025*	
8	Прилюдний захист дипломної роботи на засіданні ЕК	*16.12.2025*	

Студент _____ Я. Г. Дячук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ І. О. Клопов
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____
(підпис) (ініціали та прізвище

АНОТАЦІЯ

Дячук Я. Г. Економічні ефекти впровадження Інтернету речей у бізнес-процеси промислових підприємствах

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 051 – Економіка, науковий керівник І. О. Клопов. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні ЗНУ, кафедра інформаційної економіки, підприємництва та фінансів, 2025.

Магістерська робота присвячена обґрунтуванню та практичній реалізації моделей оцінювання економічних ефектів впровадження технологій Інтернету речей у бізнес-процеси промислового підприємства.

В роботі систематизовано теоретичні підходи до трактування сутності Інтернету речей та його ролі у цифровій трансформації бізнес-процесів промислових підприємств; проаналізовано сучасний стан, проблеми та передумови впровадження IoT-рішень у бізнес-процеси промислових підприємств України; розроблено економіко-математичну модель оцінювання економічних ефектів від упровадження IoT-технологій у ключові бізнес-процеси промислового підприємства; здійснено кількісну оцінку економічних ефектів від упровадження IoT-рішень у виробничі, логістичні та сервісні бізнес-процеси ПрАТ «Запоріжвогнетрив»; сформовано практичні рекомендації щодо подальшого використання та масштабування IoT-рішень на підприємстві.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку теоретико-методичних засад оцінювання економічних ефектів впровадження Інтернету речей у бізнес-процеси промислових підприємств.

Ключові слова: ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ (IOT), ПРОМИСЛОВЕ ПІДПРИЄМСТВО, БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ, ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ, ЕКОНОМІЧНІ ЕФЕКТИ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ

SUMMARY

Dyachuk Ya. G. Economic effects of implementing the Internet of Things in business processes of industrial enterprises.

Qualification final work for obtaining a higher education degree of master in the specialty 051 - Economics, scientific supervisor I. O. Klopov. Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu. M. Potebna ZNU, Department of Information Economics, Entrepreneurship and Finance, 2025.

The master's thesis is devoted to the justification and practical implementation of models for assessing the economic effects of implementing Internet of Things technologies in business processes of an industrial enterprise.

The work systematizes theoretical approaches to interpreting the essence of the Internet of Things and its role in the digital transformation of business processes of industrial enterprises; analyzes the current state, problems and prerequisites for implementing IoT solutions in business processes of industrial enterprises of Ukraine; an economic and mathematical model for assessing the economic effects of implementing IoT technologies in key business processes of an industrial enterprise has been developed; a quantitative assessment of the economic effects of implementing IoT solutions in production, logistics and service business processes of PrJSC "Zaporizhvognetryv" has been carried out; practical recommendations have been formulated for the further use and scaling of IoT solutions at the enterprise.

The scientific novelty of the results obtained lies in the further development of the theoretical and methodological principles for assessing the economic effects of implementing the Internet of Things in business processes of industrial enterprises.

Keywords: INTERNET OF THINGS (IOT), INDUSTRIAL ENTERPRISE, BUSINESS PROCESSES, DIGITAL TRANSFORMATION, ECONOMIC EFFECTS, ENERGY EFFICIENCY

ЗМІСТ

ВСТУП…… 8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ……. 12
1.1. Інтернет речей у системі цифрової трансформації промисловості …… 12
1.2. Бізнес-процеси промислового підприємства як об’єкт удосконалення на основі IoT …… 22
1.3. Теоретичні підходи до оцінювання економічних ефектів цифровізації та впровадження IoT на підприємствах ……... 29
1.4. Висновки до розділу 1…….. 37
РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ТА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ …… 40
2.1 Концепція моделювання впливу інтернету речей на бізнес-процеси підпрємства…….. 40
2.2 Побудова економіко-математичної моделі оцінювання економічних ефектів впровадження IoT …….. 45
2.3 Інформаційне забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів ……. 52
2.4. Висновки до розділу 2…….. 59
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА 61
3.1. Аналіз рівня цифровізації та стану бізнес-процесів ПрАТ «Запоріжвогнетрив»…… 61

3.2. Оцінювання економічних ефектів від впровадження IoT-рішень у ключові бізнес-процеси підприємства…….. 66

3.3. Оцінка сукупного економічного ефекту та практичні рекомендації щодо впровадження IoT-рішень на ПрАТ «Запоріжвогнетрив»…… 71

3.4. Висновки до розділу 3…….. 77

ВИСНОВКИ…… 80

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 84

ВСТУП

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується стрімким поширенням концепції Індустрія 4.0, ключовим елементом якої є технології Інтернету речей (Internet of Things, IoT). Їх використання дає змогу здійснювати безперервний збір, передачу та аналіз даних від виробничого обладнання, транспортних засобів, складських систем, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності бізнес-процесів промислових підприємств. Для України, промисловий комплекс якої зазнав значних втрат та структурних змін унаслідок військової агресії, впровадження IoT-технологій стає не лише інструментом підвищення конкурентоспроможності, а й важливою передумовою відновлення виробництва, ресурсозбереження та зниження операційних витрат.

Попри зростання кількості проєктів цифровізації, значна частина рішень у сфері Інтернету речей реалізується епізодично, без достатнього економічного обґрунтування та системної оцінки їх впливу на результативність бізнес-процесів. У науковій літературі переважають дослідження, зосереджені на технологічних аспектах IoT, тоді як питання комплексного вимірювання економічних ефектів – скорочення простоїв устаткування, оптимізації запасів, зниження енергоспоживання, підвищення продуктивності праці – розкриті недостатньо. Це ускладнює ухвалення інвестиційних рішень щодо цифрових проєктів, стримує їх масштабування та інтеграцію в систему стратегічного управління підприємством.

Таким чином, актуальним є розроблення теоретико-методичних підходів та практичних моделей оцінювання економічних ефектів впровадження Інтернету речей у бізнес-процеси промислових підприємств із урахуванням специфіки українських реалій. Особливої ваги набуває прикладний аналіз на основі фактичних даних конкретного підприємства, що дозволяє перевірити адекватність обраних моделей та сформувати практичні рекомендації для менеджменту. Дослідницькою базою магістерської роботи обрано ПрАТ

«Запоріжвогнетрив» – промислове підприємство вогнетривкої промисловості, для якого підвищення ефективності виробничих та логістичних процесів за рахунок цифрових технологій є одним із ключових напрямів розвитку.

Метою магістерської роботи є обґрунтування та практична реалізація моделей оцінювання економічних ефектів впровадження технологій Інтернету речей у бізнес-процеси промислового підприємства.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі *завдання*:

– систематизовано теоретичні підходи до трактування сутності Інтернету речей та його ролі у цифровій трансформації бізнес-процесів промислових підприємств;

– проаналізовано сучасний стан, проблеми та передумови впровадження IoT-рішень у бізнес-процеси промислових підприємств України;

– розроблено економіко-математичну модель оцінювання економічних ефектів від упровадження IoT-технологій у ключові бізнес-процеси промислового підприємства;

– здійснено кількісну оцінку економічних ефектів від упровадження IoT-рішень у виробничі, логістичні та сервісні бізнес-процеси ПрАТ «Запоріжвогнетрив»;

– сформовано практичні рекомендації щодо подальшого використання та масштабування IoT-рішень на підприємстві.

Об'єктом дослідження є бізнес-процеси промислових підприємств у контексті їх цифрової трансформації на основі технологій Інтернету речей.

Предметом дослідження є економічні відносини, механізми та інструменти формування і реалізації економічних ефектів від впровадження IoT-технологій у бізнес-процеси промислового підприємства.

Методичну основу дослідження становить сукупність загальнонаукових та спеціальних методів. Теоретичну базу забезпечено за допомогою діалектичного методу пізнання економічних явищ, методів логічного та порівняльного аналізу – для узагальнення підходів до сутності Інтернету речей і цифрової трансформації. Системний та процесний підходи застосовано для структуризації

бізнес-процесів промислового підприємства та визначення точок інтеграції IoT-рішень. Для оброблення статистичної та фінансової інформації використано методи економіко-статистичного аналізу, групування, індексний і трендовий аналіз. Економіко-математичне моделювання, зокрема методи регресійного аналізу, сценарного моделювання та імітаційних розрахунків, застосовано для оцінювання впливу впровадження IoT на показники ефективності бізнес-процесів і результати діяльності підприємства. Графічні методи використано для візуалізації динаміки показників і результатів моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку теоретико-методичних засад оцінювання економічних ефектів впровадження Інтернету речей у бізнес-процеси промислових підприємств. Зокрема, удосконалено підхід до класифікації економічних ефектів від використання IoT-технологій за рівнями прояву (операційний, процесний, стратегічний), що дозволяє повніше врахувати їх вплив на результативність підприємства. Дістало подальшого розвитку методичне забезпечення оцінювання ефективності цифровізації бізнес-процесів шляхом інтеграції показників функціонування IoT-систем (рівень простоїв обладнання, точність моніторингу, швидкість реагування) з фінансово-економічними індикаторами підприємства. Удосконалено підхід до моделювання інтегрального економічного ефекту впровадження IoT через поєднання елементів сценарного аналізу та багатокритеріальної оцінки, що дає змогу врахувати невизначеність зовнішнього середовища й різні варіанти масштабування цифрових рішень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в розробленні прикладного інструментарію для обґрунтування рішень щодо впровадження та розширення IoT-рішень на промислових підприємствах. Запропоновані моделі та методичні підходи можуть бути використані менеджментом ПрАТ «Запоріжвогнетрив» для оцінювання доцільності конкретних проєктів цифровізації, формування програм підвищення ефективності бізнес-процесів, оптимізації витрат і підвищення конкурентоспроможності підприємства. Окремі положення роботи можуть бути впроваджені в практику інших промислових

підприємств України, а також використані у навчальному процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін з цифрової економіки, управління проєктами цифрової трансформації та промислового менеджменту.

Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 83 сторінки друкованого тексту, містить 20 таблиць, 8 рисунків. Список використаних джерел налічує близько 53 найменувань.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Інтернет речей у системі цифрової трансформації промисловості

Цифрова трансформація промисловості в сучасних умовах відбувається під впливом комплексу технологій, які в науковій літературі об’єднують під парадигмою Індустрії 4.0. До ядра цієї парадигми відносять кіберфізичні системи, хмарні обчислення, великі дані, машинне навчання, адитивні технології та Інтернет речей (Internet of Things, IoT). У доповіді робочої групи «Industrie 4.0» Інтернет речей розглядається як один із ключових елементів мережевої інтеграції виробничих систем і ланцюгів створення вартості, що забезпечує безперервний збір даних з фізичних об’єктів і їх використання для прийняття управлінських рішень у реальному часі [1].

У класичному розумінні під Інтернетом речей розуміють глобальну інфраструктуру інформаційного суспільства, що забезпечує інтеграцію фізичних та віртуальних «речей» (обладнання, транспортних засобів, сенсорів, продукції) через унікальну ідентифікацію, можливості сенсорики, обчислення та комунікації [2]. В монографії O. Vermesan та P. Friess IoT описується як еволюція Інтернету від мережі людей до мережі об’єктів, де кожен елемент виробничої системи стає «розумним» вузлом, здатним генерувати, передавати й обробляти дані. Така інфраструктура формує основу для побудови кіберфізичних виробничих систем, що в реальному часі відображають стан «фабрики», а отже – забезпечують принципово новий рівень керованості бізнес-процесів [2].

У промисловості поступово формується окремий сегмент – Індустріальний Інтернет речей (Industrial Internet of Things, IIoT), під яким розуміють застосування IoT-технологій для інтеграції виробничого обладнання, систем

контролю, складської та транспортної інфраструктури, енергетичних установок і сервісних служб у єдиний інформаційний простір підприємства. За визначенням A. Gilchrist, IIoT є «серцем» Індустрії 4.0, оскільки забезпечує збір високочастотних даних про стан машин і процесів, що в поєднанні з аналітикою великих даних та штучним інтелектом дозволяє перейти від реактивного до проактивного управління виробництвом [3].

Глобальні тенденції розвитку ринку IoT та IIoT підтверджують стратегічну важливість цих технологій для промислових компаній. Згідно з аналітикою IoT Analytics, кількість підключених IoT-пристроїв у світі зросла до 18,8 млрд у 2024 р. і, за прогнозами, перевищить 32 млрд до 2030 р., причому істотну частку становитимуть промислові застосування [4]. За даними Grand View Research, обсяг глобального ринку індустріального Інтернету речей у 2024 р. оцінювався приблизно у 483 млрд дол. США з очікуваним зростанням до 1,69 трлн дол. до 2030 р. при середньорічних темпах зростання понад 23 % [5]. Такі показники свідчать не лише про масштаб інвестицій у IIoT-рішення, а й про зміну моделей створення доданої вартості у промисловості – від продажу обладнання до надання «цифрових сервісів» на основі даних.

Зв’язок Інтернету речей з концепцією Індустрії 4.0 простежується як на технологічному, так і на управлінському рівнях. H. Kagermann та співавтори вказують, що Індустрія 4.0 передбачає глибоку інтеграцію горизонтальних (між компаніями в ланцюгах постачання) та вертикальних (від датчика до рівня корпоративного планування) інформаційних потоків, що практично неможливо без розгорнутої IoT-інфраструктури [6]. Інтернет речей забезпечує «цифрову тінь» кожної фізичної сутності – від окремого виробу до цеху – та створює технічну основу для реалізації таких принципів Індустрії 4.0, як прозорість процесів у реальному часі, самоналаштування виробничих систем, інтегроване управління ресурсами та сервісне обслуговування продукції протягом усього життєвого циклу.

У наукових працях наголошується, що саме IoT виступає «фундаментальною технологією» переходу до підприємств нового покоління –

«розумних фабрик» (smart factories). R. Kumar та співавтори, аналізуючи понад 800 публікацій, показують, що більшість досліджень Індустрії 4.0 зосереджені на застосуваннях IoT у моніторингу виробничого обладнання, управлінні енергоспоживанням, контролі якості та логістиці [7]. I. Khan підкреслює, що без масштабного впровадження IoT неможливо забезпечити необхідний рівень прозорості та відстежуваності процесів, які є передумовою для інтеграції інших технологій Індустрії 4.0 – від автономної робототехніки до систем штучного інтелекту [8].

Важливою теоретичною передумовою для розуміння ролі Інтернету речей у цифровій трансформації промисловості є аналіз еволюції промислових революцій. У більшості досліджень виокремлюють чотири етапи: механізацію на основі парових машин (Індустрія 1.0), масове виробництво й електрифікацію (Індустрія 2.0), автоматизацію за рахунок електроніки та IT (Індустрія 3.0) та поточний етап – Індустрію 4.0, що базується на кіберфізичних системах та IoT [3; 6].

Інтернет речей у промисловості доцільно розглядати не ізольовано, а як елемент багаторівневої архітектури цифрового підприємства. На нижньому рівні розміщуються фізичні об’єкти – верстати, роботизовані комплекси, транспортні засоби, складське та енергетичне обладнання, продукція, оснащена датчиками та RFID-мітками. На наступному рівні здійснюється збір та агрегація даних за допомогою контролерів, шлюзів і промислових мереж. Вище розташовані платформи зберігання та аналітики даних (on-premise або хмарні), що інтегруються з ERP-, MES- та SCADA-системами. На верхньому рівні – додатки для підтримки управлінських рішень, прогнозного обслуговування, оптимізації графіків виробництва тощо.

Продовжуючи розгляд ролі Інтернету речей у цифровій трансформації промисловості, доцільно деталізувати, яким чином ця технологія змінює логіку розвитку виробництва та формування економічних ефектів. Аналітики McKinsey Global Institute підкреслюють, що саме b2b-застосування IoT у промисловості, логістиці та енергетиці мають найбільший потенціал створення вартості – до 11,1

трлн дол. США додаткового економічного ефекту на рік у глобальному вимірі [9]. Це означає, що Інтернет речей переходить із площини «допоміжної» технології у статус базової інфраструктури промислового зростання, порівнянної за впливом із механізацією чи електрифікацією виробництва в попередні промислові революції.

Узагальнення еволюції промислових революцій з позицій ключових технологій та економічних ефектів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Еволюція промислових революцій та роль ключових технологій

Промислова революція	Орієнтовний період	Ключові технології	Організаційні принципи виробництва	Основні економічні ефекти
Індустрія 1.0	Кінець XVIII – поч. XIX ст.	Парова машина, механічні верстати	Механізація ручної праці, фабрична система	Різке зростання продуктивності праці, концентрація виробництва
Індустрія 2.0	Кінець XIX – серед. XX ст.	Електрифікація, конвеєр, масове виробництво	Стандартизація, поділ праці, серійність	Зниження собівартості, розширення ринків збуту, масове споживання
Індустрія 3.0	Друга половина XX ст.	Електроніка, ЧПК-верстати, IT-системи	Автоматизація окремих операцій і ліній, MRP/ERP-системи	Подальше зростання продуктивності, контроль якості, оптимізація запасів
Індустрія 4.0	Поч. XXI ст. – дотепер	Кіберфізичні системи, IoT, великі дані, ШІ, хмари	Інтегровані цифрові ланцюги створення вартості, «розумні» фабрики, масова кастомізація	Операції у реальному часі, гнучкість і персоналізація виробництва, сервісні бізнес-моделі, зниження витрат та підвищення стійкості

Як видно з табл. 1.1, специфіка Індустрії 4.0 полягає не лише у впровадженні нового покоління автоматизації, а насамперед у повній цифровій прозорості бізнес-процесів завдяки мережам IoT-пристроїв, здатних у режимі

реального часу передавати дані про стан обладнання, потоки матеріалів, якість продукції, споживання ресурсів тощо [3; 7]. На відміну від попередніх етапів, де домінувало поняття «автоматизованої лінії», нині формується концепція «цифрового двійника» підприємства, що базується саме на масовому застосуванні датчиків та засобів комунікації.

З позицій бізнес-процесів промислових підприємств Інтернет речей забезпечує низку типових сценаріїв використання, які в узагальненому вигляді можна згрупувати за функціональними напрямами: виробництво, технічне обслуговування, логістика й складські операції, енергоменеджмент, охорона праці та промислова безпека. На основі систематизації аналітичних звітів McKinsey [9], Всесвітнього економічного форуму [10, 13, 14], Accenture [11] і галузевих оглядів узагальнений перелік найпоширеніших застосувань IIoT у бізнес-процесах наведено в табл. 1.2.

Як показує табл. 1.2, економічний ефект від застосування IoT формується на перетині технологічних можливостей і змін у бізнес-процесах. Наприклад, перехід від планово-попереджувального обслуговування до предиктивного дозволяє скоротити незаплановані простої на 30–50 %, а витрати на ремонт – на 10–40 % залежно від галузі [9]. Аналогічно, використання IoT-рішень у системах енергоменеджменту забезпечує зниження енергоспоживання на 10–20 % завдяки виявленню неефективних режимів роботи обладнання й пікових навантажень [12; 14.

З точки зору архітектури цифрового підприємства, Інтернет речей виступає проміжною ланкою між фізичним рівнем (обладнання, транспорт, інженерна інфраструктура, продукція) та рівнем корпоративних інформаційних систем (ERP, MES, SCM тощо). Згідно з підходом, запропонованим у звітах Європейської комісії та Technopolis Group [14], а також у дослідженнях Accenture [11], архітектуру IIoT-системи доцільно розглядати як багаторівневу:

Пристрої та сенсори – обладнання з вбудованими датчиками, контролери, RFID-мітки, «розумні» інструменти, носимі пристрої.

Таблиця 1.2 – Ключові бізнес-процеси промислового підприємства та типові застосування Індустріального Інтернету речей

Бізнес-процес	Типове IIoT-застосування	Приклади використовуваних даних і датчиків	Ключові показники ефективності (KPI), на які впливає IoT
Виробничі операції (формування партій, обробка, випал, збірка тощо)	Онлайн-моніторинг стану устаткування та параметрів процесу, автоматичне коригування режимів роботи	Датчики температури, вібрації, тиску, вологості, витрати сировини; дані PLC/SCADA	Продуктивність обладнання (OEE), вихід придатної продукції, рівень браку, час циклу
Технічне обслуговування і ремонт	Предиктивне (прогнозне) обслуговування на основі аналізу вібрацій, температури, струмів	Вібросенсори, струмові кліщі, історія простоїв, журнали аварій	Час простою устаткування, частота аварій, витрати на ремонт, коефіцієнт готовності обладнання
Логістика та складське господарство	Відстеження матеріальних потоків і транспортних засобів у реальному часі, оптимізація маршрутів	RFID-мітки, GPS-трекери, датчики умов зберігання (t°, вологість), дані WMS/TMS	Рівень запасів, час обробки замовлення, втрати від псування та недостач, завантаженість транспорту
Енергетичне господарство	Системи енергомоніторингу та автоматизованого управління споживанням енергоносіїв	Лічильники електроенергії, газу, пари; датчики споживання на вузлах; дані про пікові навантаження	Споживання енергії на одиницю продукції, витрати на енергоносії, рівень CO_2-викидів
Управління якістю та простежуваність	IoT-платформи відстеження життєвого циклу продукції (track & trace), контроль умов виробництва	Логування параметрів процесу, серійні номери, QR/RFID-ідентифікація, дані лабораторного контролю	Відсоток рекламацій, витрати на гарантійний ремонт, рівень відповідності стандартам
Охорона праці та промислова безпека	Моніторинг стану робочого середовища та персоналу (wearables, «розумні» каски, браслети)	Датчики газу, шуму, пилу, температури; трекери місцезнаходження працівників	Кількість нещасних випадків, час реагування на інциденти, рівень дотримання вимог безпеки

Рівень зв’язку – промислові мережі (Ethernet/IP, Profinet, Modbus тощо), бездротові технології (Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, NB-IoT, LTE-M).

Edge-рівень – промислові шлюзи та edge-контролери, які здійснюють попередню обробку даних, фільтрацію та локальну аналітику для зменшення затримок.

IoT-платформа / хмарні сервіси – централізоване сховище даних, сервіси аналітики та візуалізації, засоби керування пристроями та безпекою.

Бізнес-додатки та аналітика – модулі предиктивного обслуговування, оптимізації виробництва, енергоменеджменту, моделі підтримки прийняття рішень, інтегровані з ERP/MES.

Саме на цьому «верхньому» рівні відбувається трансформація технічних показників у економічні результати – скорочення простоїв, підвищення продуктивності, зменшення браку, економія енергоресурсів, зростання гнучкості виробництва. Світовий економічний форум у своїх кейс-стадіях показує, що підприємства, які системно впровадили IIoT-рішення в ключові бізнес-процеси, досягають підвищення продуктивності на 20–30 %, скорочення часів циклу на 30–50 % та зниження енергоспоживання до 20 %.

Візуально місце Інтернету речей в архітектурі цифрового промислового підприємства доцільно подати у вигляді багаторівневої схеми (рис. 1.1), де відображено взаємозв’язки між фізичними об’єктами, мережами передачі даних, IoT-платформою та бізнес-додатками.

Впровадження Інтернету речей у промисловості не є автоматичним продовженням технічного прогресу – воно потребує певних організаційно-економічних передумов і стикається з комплексом бар’єрів. Узагальнення міжнародних досліджень показує, що навіть за високої поінформованості менеджменту про потенційні вигоди IIoT значна частина підприємств перебуває лише на етапі пілотних проєктів або фрагментарних рішень, які не масштабуються на весь ланцюг створення вартості. Для переходу до системної цифрової трансформації потрібно поєднання стратегічного бачення, доступу до інвестиційних ресурсів, зрілої IT-архітектури та компетенцій персоналу.

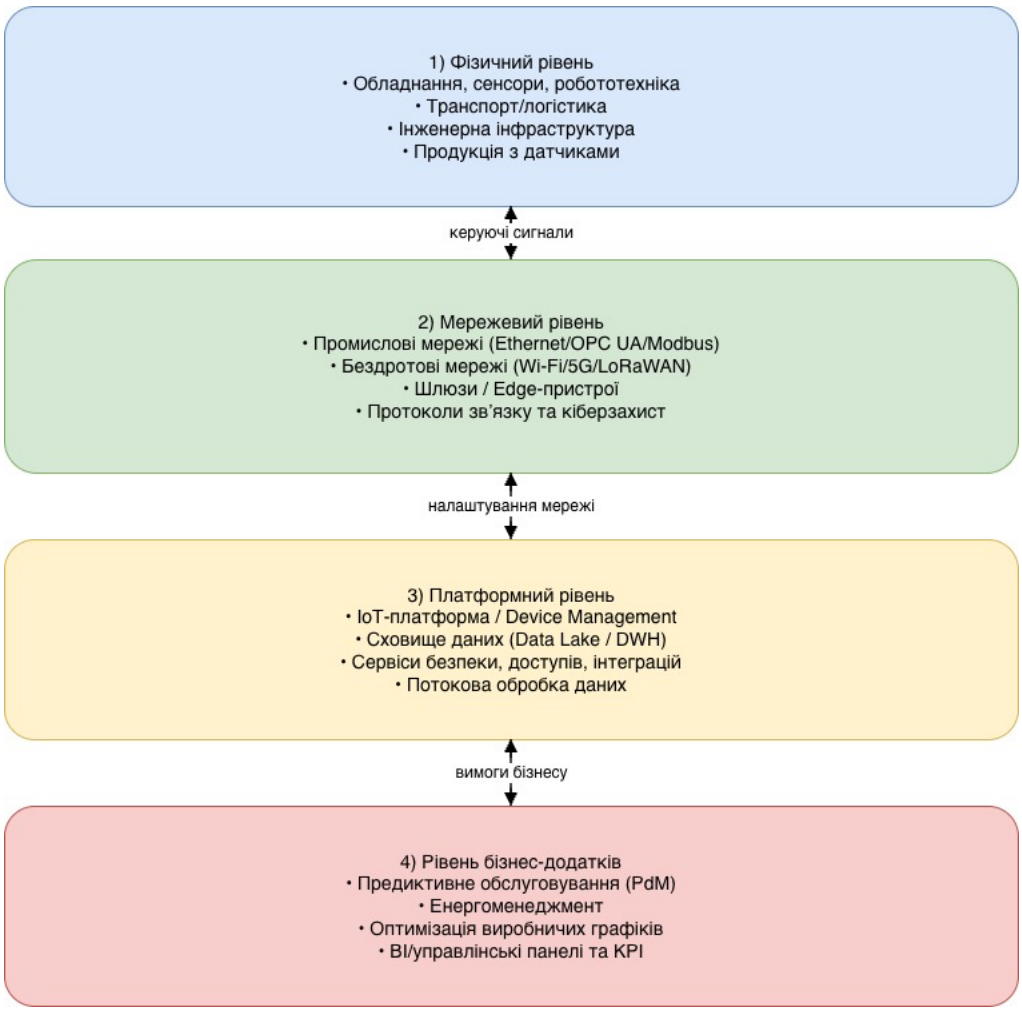


Рисунок 1.1 – Місце технологій Інтернету речей в архітектурі цифрового промислового підприємства

Результати опитувань у різних галузях свідчать, що підприємства найчастіше називають серед бар'єрів високу початкову вартість рішень, складність інтеграції з наявними виробничими системами, брак кваліфікованих фахівців і невизначеність економічного результату. Дослідження A. Bosche та співавт. на вибірці малих і середніх підприємств харчової промисловості показало, що навіть у випадку очевидних операційних вигод керівники не готові інвестувати в IoT без чітко розрахованої окупності й доступу до зовнішнього фінансування [16]. Подібні результати отримано в роботі H. Shahriar та колег, де саме відсутність стандартизованих підходів до розрахунку ROI для IoT-проєктів визначено як один із ключових стримувальних факторів, особливо в умовах значних капітальних витрат [17].

Узагальнену класифікацію основних бар'єрів впровадження Інтернету речей у промисловості наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Ключові бар'єри впровадження Інтернету речей у промисловості та їх економічні наслідки

Група бар'єрів	Конкретні прояви	Потенційні економічні наслідки
Інвестиційно-фінансові	Висока вартість сенсорів, контролерів, ліцензій, мережевої інфраструктури; значні витрати на інтеграцію та підтримку; складність доступу до довгострокового фінансування	Відкладення або скорочення масштабів проєктів; реалізація лише «точкових» рішень; повільна окупність інвестицій
Технологічні та інтеграційні	Наявність застарілого обладнання без цифрових інтерфейсів; відсутність єдиних стандартів; проблеми сумісності між системами різних виробників	Зростання витрат на модернізацію й ретрофітинг; ризики збоїв у виробництві під час впровадження; обмежена масштабованість рішень
Кадрові та організаційні	Дефіцит фахівців із data-science, OT/IT-інтеграції, кібербезпеки; опір змінам з боку персоналу; відсутність досвіду управління даними	Неефективне використання зібраних даних; затримки у впровадженні; ризик повернення до традиційних практик
Стратегічні та управлінські	Відсутність чітко сформульованого бізнес-кейсу; фокус на пілотах без плану масштабування; нестача лідерства на рівні топ-менеджменту	«Пастка пілотних проєктів», коли очікуваний економічний ефект не реалізується; розпорошення ресурсів
Кібербезпека та захист даних	Низький рівень захищеності вбудованих пристроїв; множинність точок доступу; відсутність стандартів безпеки для IIoT	Ризики кіберінцидентів, простої виробництва, витоку даних; необхідність додаткових інвестицій у безпеку
Регуляторні та інституційні	Невизначеність вимог щодо обробки промислових даних, відсутність стимулів для інновацій, слабка координація політики	Обмежена кількість пілотних зон і «регуляторних пісочниць»; низька привабливість інвестицій у високотехнологічні проєкти

Особливе місце серед бар'єрів посідають питання кібербезпеки. У доповіді ENISA щодо безпеки Індустрії 4.0 підкреслюється, що перехід від ізольованих виробничих мереж до повністю підключених IIoT-систем різко підвищує «площу атаки» – зростає кількість потенційних точок проникнення зловмисників у виробничі процеси. Аналіз останніх інцидентів у промисловому секторі показує, що компрометація навіть окремого IoT-пристрою може призвести до зупинки конвеєрів, порушення логістики або витоку чутливих технологічних даних [10; 11]. Це змушує промислові підприємства переглядати традиційні підходи до

інформаційної безпеки й переходити до «безпеки за дизайном» – інтеграції вимог кіберзахисту в архітектуру IIoT-рішень на всіх етапах їх життєвого циклу.

Не менш суттєвим є кадровий вимір цифрової трансформації. Огляд McKinsey показує, що успішні цифрові трансформації, включно з IIoT-проєктами, вирізняються системними програмами розвитку компетенцій, залученням міждисциплінарних команд і новими моделями взаємодії між IT- і виробничими підрозділами [9]. Окремі дослідження наголошують, що брак компетентного персоналу називається підприємствами так само часто, як і фінансові бар'єри [18-20]. Для подолання цього виклику рекомендовано поєднувати внутрішні програми перепідготовки персоналу з партнерствами з університетами та провайдерами цифрових послуг.

Ситуація в Україні має свої особливості. Дослідження розвитку Індустрії 4.0 свідчать, що український промисловий сектор загалом відстає за рівнем цифрової зрілості від країн ЄС, але водночас має потужний інженерний і IT-потенціал. Г. Кришталь виділяє вісім ключових «важелів створення вартості» від впровадження технологій Індустрії 4.0 в Україні – оптимізацію режимів і завантаження обладнання, підвищення продуктивності й безпеки праці, логістичну оптимізацію, покращення якості продукції, прогнозування попиту, скорочення термінів виходу продукції на ринок та розвиток сервісних моделей [20]. Утім, реалізація цього потенціалу обмежується дефіцитом інвестицій, високою часткою застарілих основних фондів і нерівномірністю доступу до сучасної цифрової інфраструктури [21].

Аналітичні огляди, присвячені Україні та країнам Центрально-Східної Європи, наголошують, що саме промислові підприємства з високою енергоємністю та експортною орієнтацією найактивніше проявляють інтерес до IoT-рішень у сферах енергоменеджменту, моніторингу стану обладнання та контролю технологічних параметрів. Водночас більшість проєктів реалізуються у форматі локальних ініціатив без інтеграції в загальнокорпоративну стратегію цифрової трансформації. Це частково пов'язано з тим, що на національному рівні

лише формується інституційна екосистема Індустрії 4.0 – галузеві асоціації, центри компетенцій, програми підтримки інновацій.

Для промислових підприємств, ключовим завданням стає побудова збалансованої стратегії впровадження Інтернету речей, яка поєднує технічну модернізацію з економічним обґрунтуванням і управлінням ризиками. Дослідження McKinsey щодо успішних IIoT-проєктів виділяють кілька критичних факторів: чітке формулювання бізнес-кейсу з прив'язкою до фінансових результатів; поетапне масштабування від пілотів до «фабрики-маяка»; створення міжфункціональних команд і цифрових центрів компетенцій; активне управління змінами й культурою даних [9]. Багато з цих факторів є універсальними й повинні враховуватися при розробленні моделей оцінювання економічних ефектів від IoT, що дозволить перетворити цифровізацію з технічного тренду на інструмент сталого зростання вартості промислових підприємств.

1.2. Бізнес-процеси промислового підприємства як об'єкт удосконалення на основі IoT

Процесний підхід сьогодні є базою сучасного менеджменту промислових підприємств, оскільки дозволяє розглядати діяльність компанії як цілісну систему взаємопов'язаних бізнес-процесів, а не як набір ізольованих функцій. У науковій літературі наголошується, що саме якість організації бізнес-процесів визначає здатність промислових підприємств адаптуватися до викликів цифрової трансформації й використати потенціал технологій Industry 4.0, зокрема Internet of Things (IoT) [22, 23].

Різні автори по-різному трактують поняття «бізнес-процес». Класики процесного підходу Т. Девенпорт та Д. Шорт пропонують розглядати бізнес-процес як послідовність логічно пов'язаних дій, які використовують ресурси компанії та створюють продукт, що має цінність для споживача [24].

М. Хаммер і Дж. Чампі акцентують увагу на тому, що бізнес-процес охоплює комплекс взаємопов’язаних видів діяльності, в ході яких на вході використовується один або кілька видів ресурсів, а на виході формується продукт для клієнта; саме радикальне переосмислення таких процесів є змістом реінжинірингу [25]. У стандартах ISO 9001 процес визначається як сукупність взаємопов’язаних та взаємодіючих видів діяльності, що перетворюють входи у виходи, які підлягають вимірюванню та контролю [5].

Українські дослідники наголошують, що в умовах цифрових змін бізнес-процес доцільно розуміти як стійку, цілеспрямовану сукупність взаємопов’язаних дій, подій та управлінських рішень, що реалізуються із використанням інформаційно-цифрових технологій і приводять до створення цінності для внутрішніх й зовнішніх стейкхолдерів [26, 27]. Узагальнення сучасних підходів показує, що центральним елементом усіх трактувань є перетворення ресурсів у результат, який вимірюється через показники ефективності й задоволеності споживача.

Таблиця 1.4 – Еволюція трактувань поняття «бізнес-процес»

Автор / джерело	Узагальнене визначення (скорочено, авторська інтерпретація)	Ключовий акцент
Девенпорт, Шорт [24]	Логічно пов’язана послідовність дій, що використовує ресурси й створює результат для клієнта	Орієнтація на інформаційні технології та міжфункціональні потоки
Хаммер, Чампі [25]	Комплекс різних видів діяльності, які перетворюють ресурси на продукт, що має цінність	Фокус на радикальній перебудові процесів (реінжиніринг)
ISO 9001	Сукупність взаємопов’язаних та взаємодіючих дій, які перетворюють входи у виходи	Наголос на вимірюваності та керованості процесів
Штапаук [23]	Система дій і операцій, що відображає спосіб реалізації функцій підприємства в часі та просторі	Процес як атрибут діяльності суб’єкта управління
Чорна, Уніят [26]	Стійка сукупність операцій, рішень та інформаційних потоків, спрямована на досягнення цілей підприємства	Поєднання операційної й управлінської складових
Чернікова [27]	Цифрово підтримувана послідовність дій, що формує інноваційну цінність для стейкхолдерів	Урахування впливу цифровізації на структуру процесів

Систематизація підходів у табл. 1.4 показує, що для подальшого дослідження доцільно використовувати інтегроване визначення: бізнес-процеси промислового підприємства – це стійкі, керовані та вимірювані послідовності взаємопов’язаних дій, операцій і управлінських рішень, які за допомогою виробничих, інформаційних та цифрових технологій перетворюють ресурси у продукцію та послуги з визначеною цінністю для клієнтів і власників. Саме така інтерпретація дозволяє прямо пов’язати процесний підхід із завданнями цифрової трансформації та впровадження IoT.

У діяльності промислових підприємств виділяють три базові групи бізнес-процесів: основні (операційні), забезпечувальні та управлінські.

Основні процеси пов’язані зі створенням основного продукту (виробництво, логістика, збут), забезпечувальні формують ресурсну базу (фінанси, персонал, інфраструктура, IT), а управлінські забезпечують стратегічне й тактичне керування всією системою. Для промислових компаній важливим є також виділення інноваційно-розвиткових процесів (R&D, модернізація обладнання, екологічні проєкти), які визначають довгострокову конкурентоспроможність.

На практиці структура бізнес-процесів промислового підприємства часто описується у вигляді ієрархічної моделі: від стратегічних «процесів верхнього рівня» (формування стратегії, портфеля продуктів, інвестиційної політики) до операційних процедур на рівні цехів та робочих місць. Такий підхід забезпечує прозорість потоків створення цінності та дозволяє визначити «вузькі місця», що потребують цифрового вдосконалення. Узагальнена архітектура бізнес-процесів промислового підприємства представлена на рис. 1.2.

Сучасні автори пропонують здійснювати класифікацію бізнес-процесів з урахуванням їх ролі у створенні цінності, ступеня стандартизації, рівня автоматизації, а також можливостей цифрового вдосконалення.

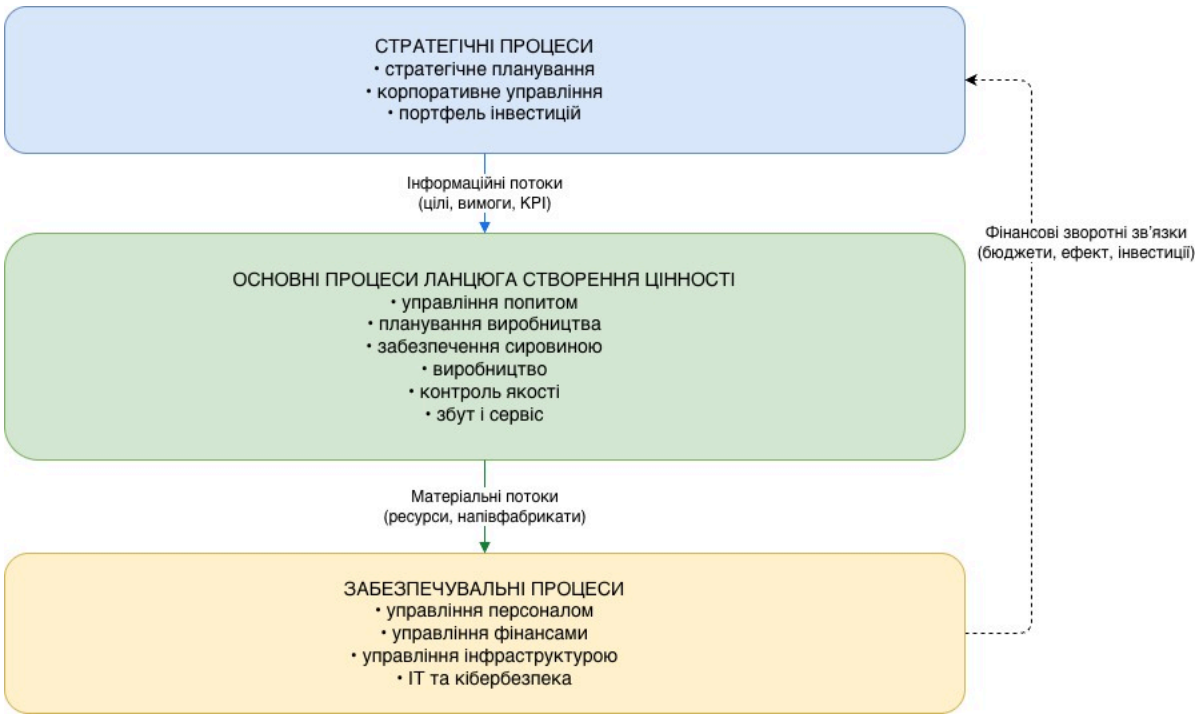


Рисунок 1.2 – Узагальнена архітектура бізнес-процесів промислового підприємства

Для промисловості особливо важливими є критерії «частка витрат у собівартості продукції», «вплив на якість» і «чутливість до простоїв», оскільки саме за цими параметрами зазвичай оцінюється економічний ефект впровадження технологій IoT.

У табл. 1.5 зведено ключові групи процесів, їх показники ефективності та можливі напрями впливу IoT. Для промислових підприємств важливими інтегральними показниками є, зокрема, OEE – загальна ефективність використання обладнання, що агрегує коефіцієнти доступності, продуктивності та якості. Дослідження показують, що застосування цифрових інструментів моніторингу та аналізу OEE дає можливість виявити втрати часу й продуктивності, які раніше залишалися «прихованими» у ручних облікових системах [28].

З позицій цифрової трансформації бізнес-процеси виступають одночасно і об’єктом, і інструментом удосконалення. З одного боку, цифрові технології використовуються для формалізації й автоматизації процесів; з іншого – самі

процеси змінюються під впливом нових можливостей аналізу даних, інтеграції ланцюга постачання, сервісних моделей тощо.

Таблиця 1.5 – Основні групи бізнес-процесів промислового підприємства та ключові показники їх результативності

Група процесів	Приклади процесів	Типові показники (KPI)	Потенціал впливу IoT
Виробничі (core)	Підготовка виробництва, основні технологічні операції, контроль якості	OEE (Overall Equipment Effectiveness), вихід придатної продукції, цикл виробництва, виробничі витрати на одиницю продукції	Онлайн-моніторинг стану обладнання, контроль параметрів технологічних режимів, автоматичний збір даних для OEE-аналітики
Логістичні та складські	Постачання сировини, управління запасами, внутрішньоцехові переміщення, відвантаження продукції	Рівень сервісу, оборотність запасів, час виконання замовлення, втрати від дефіциту/надлишку	Ідентифікація об’єктів через RFID/датчики, трекінг вантажів, автоматизований облік залишків, оптимізація маршрутів
Процеси технічного обслуговування й ремонту	Планово-попереджувальні та аварійні ремонти, діагностика стану обладнання	Частка незапланованих простоїв, витрати на ремонт, середній час відновлення (MTTR), коефіцієнт готовності обладнання	Впровадження predictive maintenance на базі IoT-сенсорів, аналіз вібрацій, температури, струмів, автоматичне формування заявок на ремонт
Енергетичні та екологічні	Споживання електроенергії, газу, теплоти, води; викиди та відходи	Питоме енергоспоживання, витрати на енергоресурси, рівень викидів CO_2, штрафи за порушення екостандартів	Смарт-лічильники, система енергоменеджменту 4.0, автоматична оптимізація навантаження, виявлення втрат і аномалій
Управлінські та інноваційні	Стратегічне планування, бюджетування, управління портфелем проєктів, R&D	Рентабельність продажів, рентабельність інвестицій (ROI), тривалість інноваційного циклу, частка нової продукції в доході	Аналітичні платформи, цифрові дашборди KPI, інтеграція даних з IoT у систему підтримки управлінських рішень

Для українських промислових підприємств ця логіка є критично важливою, оскільки рівень цифровізації бізнесу все ще суттєво відстає від середніх показників країн ОЕСР, а ключові обмеження пов'язані саме з низькою зрілістю процесів і дефіцитом даних для прийняття рішень.

Згідно з оцінками McKinsey, до 2030 р. до 26 % потенційного економічного ефекту IoT припадатиме саме на виробничі майданчики та промислові підприємства; у грошовому вимірі це 1,4–3,3 трлн дол. США на рік [29].

Значна частина цього ефекту формується через оптимізацію бізнес-процесів: скорочення простоїв обладнання, зменшення втрат якості, оптимізацію запасів, енергозбереження й підвищення гнучкості виробництва. Інше дослідження McKinsey показує, що впровадження комплексних рішень Industry 4.0 (включно з IoT) дає змогу зменшити простої обладнання на 30–50 %, збільшити пропускну спроможність виробничих ліній на 10–30 % та підвищити продуктивність праці на 15–30 % [30].

На рисунку 1.3 представлено концептуальну схему впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства.

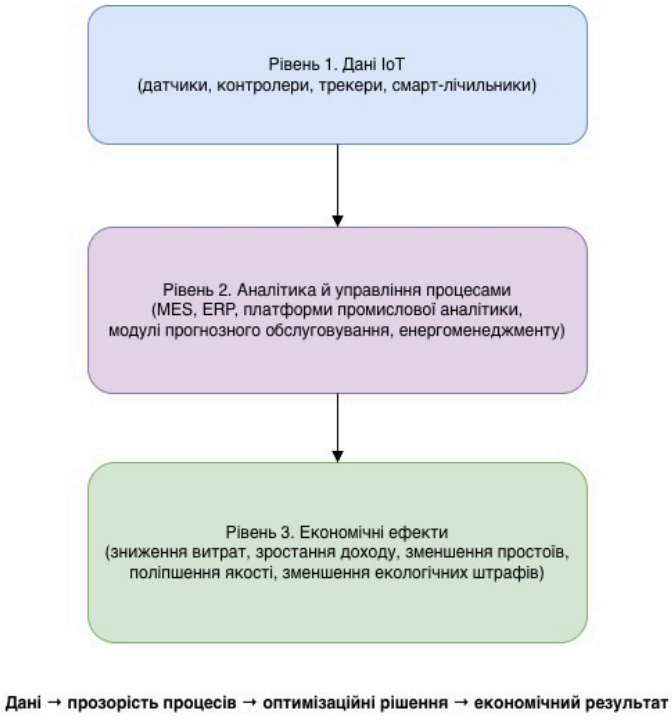


Рисунок 1.3 – Концептуальна схема впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства

Емпіричні дослідження підтверджують, що найбільш відчутні економічні ефекти впровадження IoT досягаються у бізнес-процесах технічного обслуговування та ремонту, виробничих операціях і енергоменеджменті. Застосування predictive maintenance на основі IoT-сенсорів (вібрації, температури, струмів, тиску тощо) дозволяє зменшити витрати на ремонт на 18–40 %, скоротити незаплановані простої обладнання до 30–50 % і подовжити строк служби основних фондів на 20–40 %. У логістичних процесах IoT забезпечує суттєве скорочення помилок обліку запасів і втрат від дефіциту завдяки автоматичній ідентифікації й трекінгу матеріальних потоків.

В енергетичних процесах IoT-технології виступають ядром концепції «Енергоменеджмент 4.0». Оглядові дослідження демонструють, що цифрові рішення Industry 4.0 (сенсори, системи збору енергоданих, аналітичні платформи, автоматизоване керування навантаженням) є ключовим фактором впровадження практик енергоменеджменту згідно зі стандартом ISO 50001 на промислових підприємствах [17; 18]. У ряді кейсів інтегровані IoT-рішення для систем освітлення та HVAC у промислових та комерційних будівлях забезпечують скорочення споживання електроенергії на 10–20 % завдяки автоматизованому контролю й оптимізації режимів роботи. Хоча наведені оцінки здебільшого базуються на прикладах будівельного сектора, принципи безперервного моніторингу та гнучкого керування енергоспоживанням безпосередньо переносяться на промислові об’єкти.

Узагальнення результатів досліджень дозволяє подати типові економічні ефекти впровадження IoT у ключові бізнес-процеси промислових підприємств (табл. 1.6).

Представлені в табл. 1.6 оцінки демонструють, що IoT має найбільший вплив саме на ті бізнес-процеси, де існує висока частка витрат у собівартості продукції й значні втрати від простоїв або неефективного використання ресурсів.

Таблиця 1.6 – Типові економічні ефекти впровадження IoT у бізнес-процеси промислових підприємств (за даними міжнародних досліджень)

Бізнес-процес	Приклади IoT-рішень	Зафіксовані ефекти
Технічне обслуговування й ремонт	Датчики стану обладнання, вібраційний моніторинг, аналітика відмов	Зменшення витрат на ремонт на 18–40 %; скорочення незапланованих простоїв на 30–50 %; приріст строку служби обладнання на 20–40 %
Виробничі операції та контроль якості	Онлайн-моніторинг параметрів процесу, автоматичний збір виробничих даних, інтеграція з MES	Зростання пропускної спроможності ліній на 10–30 %; скорочення часу виробничого циклу; підвищення продуктивності праці на 15–30 %; зменшення відсотка браку
Логістика й управління запасами	RFID-мітки, трекінг транспорту, смарт-склади	Зменшення запасів на 15–25 % при збереженні рівня сервісу; скорочення часу обробки замовлення на 20–30 %
Енергоменеджмент	Смарт-лічильники, системи моніторингу енергоспоживання, автоматизоване керування навантаженням	Підвищення прозорості енергоспоживання, прискорення виявлення втрат; у окремих кейсах – зниження споживання електроенергії на 10–20 % і суттєве скорочення викидів CO_2
Управління виробничою безпекою та екологічними ризиками	Датчики газів, температури, тиску, моніторинг викидів	Зменшення кількості аварійних ситуацій, штрафів за порушення екологічних нормативів, підвищення рівня охорони праці

Для важкої промисловості України ключовими є процеси енергоємного випалу продукції, утримання високотемпературного обладнання, логістика сировини та готової продукції, а також енергетичні й екологічні процеси. Саме ці процеси мають стати пріоритетними об’єктами цифрового вдосконалення на основі IoT, що буде розкрито у подальших розділах кваліфікаційної роботи.

1.3. Теоретичні підходи до оцінювання економічних ефектів цифровізації та впровадження IoT на підприємствах

Активне впровадження цифрових технологій та рішень Інтернету речей вимагає від промислових підприємств значних інвестицій у обладнання, програмне забезпечення, мережеву інфраструктуру та розвиток компетенцій

персоналу. Дослідження показують, що саме здатність виміряти економічні результати таких інвестицій є критичним фактором для масштабування цифрових проєктів, оскільки керівництво часто не готове розширювати пілотні ініціативи за відсутності чітко підтвердженої окупності [31]. Цифровізація та IoT створюють складний набір ефектів – від прямого зниження витрат і зростання продуктивності до непрямих вигод у вигляді підвищення гнучкості, якості, стійкості ланцюгів постачання та інноваційного потенціалу. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до оцінювання економічних наслідків цифрових трансформацій.

У теорії управління інвестиціями під економічним ефектом зазвичай розуміють різницю між результатами та витратами, пов’язаними з реалізацією певного проєкту, у грошовому вимірі з урахуванням чинника часу. Однак для цифрових та IoT-проєктів коло ефектів значно ширше, оскільки частина вигод має нефінансовий або відкладений характер. Систематизуючи підходи, що містяться в роботах щодо цифровізації виробництва та Industry 4.0 [32, 33], можна виділити такі групи економічних ефектів:

– прямі фінансові ефекти, які безпосередньо відображаються у звітах про фінансові результати (зменшення витрат на ремонт, енергоресурси, персонал; зростання виручки завдяки підвищенню обсягів виробництва або ціни за рахунок якості);

– опосередковані фінансові ефекти, які реалізуються через зміни ризиків, гнучкості або інноваційної спроможності (зниження простоїв, скорочення втрат від браку, зменшення штрафів, приріст частки ринку);

– нематеріальні ефекти, пов’язані з репутацією, знаннями, задоволеністю клієнтів і персоналу (зростання індексу лояльності клієнтів, привабливості роботодавця, якості даних для управління).

Узагальнену класифікацію економічних ефектів цифровізації та впровадження IoT наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Економічні ефекти цифровізації та впровадження IoT на промислових підприємствах

Рівень прояву	Тип ефекту	Приклади проявів	Можливі показники вимірювання
Процесний (окремі операції, цехи)	Прямі витратні	Скорочення простою обладнання; зменшення витрат на ремонт; зниження споживання енергії	OEE, тривалість простоїв, витрати на ремонт, питомі енерговитрати, собівартість одиниці продукції
	Прямі дохідні	Зростання обсягу випуску; підвищення якості й ціни реалізації	Обсяг реалізації, частка браку, ціна реалізації, маржа внеску
Рівень підприємства	Опосередковані	Підвищення гнучкості виробничої програми; скорочення запасів; зменшення штрафів за порушення екологічних і безпекових норм	Оборотність запасів, частота зміни номенклатури, розмір штрафів, коефіцієнти фінансової стійкості
	Нематеріальні	Зростання інноваційної активності; поліпшення якості управлінських рішень; підвищення задоволеності клієнтів	Частка нової продукції, тривалість інноваційного циклу, NPS, оцінка якості сервісу
Рівень ланцюга створення вартості	Мережеві й екосистемні	Підвищення прозорості ланцюга постачання; зниження транзакційних витрат; формування нових цифрових сервісів	Час циклу замовлення, витрати на координацію, частка доходів від сервісних послуг

Такий поділ підкреслює, що стандартні фінансові показники (прибуток, рентабельність, грошовий потік) фіксують лише частину сукупного ефекту. Для повноцінної оцінки цифрових ініціатив доцільно поєднувати фінансові метрики з операційними KPI та індикаторами нематеріальних результатів.

Класичні підходи до оцінювання інвестиційних проєктів базуються на розрахунку показників окупності та ефективності: періоду окупності (Payback Period), простої та дисконтованої рентабельності інвестицій (ROI), чистого дисконтованого доходу (Net Present Value, NPV), внутрішньої норми дохідності (Internal Rate of Return, IRR) тощо. У випадку цифрових та індустріальних IoT-проєктів ці методи залишаються базовими, але потребують корекції структури грошових потоків, обліку непрямих ефектів та специфічних ризиків [34].

Пшиченко, аналізуючи методологію розрахунку ROI для цифрових рішень у виробничих системах, пропонує розрізняти капітальні витрати (CapEx – придбання обладнання, програмного забезпечення, створення інфраструктури) та операційні витрати (OpEx – ліцензійні платежі, технічна підтримка, хмарні сервіси, навчання персоналу) [33]. Автор наголошує на необхідності врахування часової динаміки вигод, оскільки значна частина ефектів проявляється лише після масштабування рішень і зміни бізнес-процесів. У статті наведено алгоритм розрахунку ROI, який включає ідентифікацію прямих та непрямих вигод, їх грошовий вимір, формування прогнозу грошових потоків та розрахунок інтегральних показників (ROI, NPV, IRR).

Водночас дослідження, присвячені оцінюванню інвестицій в Industry 4.0, підкреслюють обмеженість виключно фінансових критеріїв. Так, у роботі Rocchi та співавт. запропоновано багатокритеріальну рамку (MCDM-підхід), що поєднує фінансові, технологічні та соціотехнічні фактори при обґрунтуванні інвестицій в роботизовані, IoT-та аналітичні рішення [35]. Автори використовують методи аналізу ієрархій та зваженого скорингу, дозволяючи менеджерам враховувати не лише очікуваний грошовий потік, а й рівень ризику, вплив на компетенції персоналу, відповідність стратегічним пріоритетам підприємства.

Практичні рекомендації щодо оцінювання ROI проєктів Industry 4.0 подаються також у професійних оглядах і консультаційних матеріалах. Наприклад, Enlyze та Hiotron акцентують увагу на необхідності побудови «простих історій ROI», де для кожного сценарію використання IoT чітко визначаються вихідні показники, очікувані зміни (у % або абсолютних величинах) та часовий горизонт їх досягнення [34]. Це дозволяє зменшити невизначеність для управлінців і полегшує порівняння альтернативних проєктів.

У табл. 1.8 систематизовано основні фінансові методи оцінювання інвестицій у цифровізацію та IoT.

Таблиця 1.8 – Основні фінансові методи оцінювання інвестицій у цифровізацію та IoT

Метод	Коротка характеристика	Переваги	Обмеження щодо цифрових/IoT-проєктів
Простий ROI	Відношення середньорічного прибутку до суми інвестицій	Простота розрахунку, зрозумілість для менеджменту	Ігнорує чинник часу, не враховує структуру грошових потоків і ризики
NPV	Сума дисконтованих грошових потоків мінус інвестиції	Враховує часову вартість грошей, дає абсолютний ефект	Чутливий до припущень щодо ставки дисконту та прогнозів вигод
IRR	Дисконтна ставка, за якої NPV = 0	Дає «внутрішню» норму дохідності, зручно порівнювати з вартістю капіталу	Може мати декілька рішень, складний для інтерпретації при нетипових потоках
Період окупності (PP, DPP)	Час, за який кумулятивний (дисконтований) потік стає ≥ 0	Орієнтація на ліквідність, зрозумілий для практиків	Не враховує ефекти після періоду окупності, неадекватний для довгострокових вигод
TCO (Total Cost of Ownership)	Оцінка повної вартості володіння цифровим рішенням (CapEx + OpEx) за життєвий цикл	Дозволяє порівнювати рішення з різною структурою витрат (on-premise vs cloud)	Фокусується на витратах, не дає прямої оцінки вигод
MCDM-підхід	Поєднання фінансових і нефінансових критеріїв з вагами	Враховує якісні аспекти, ризики, стратегічну важливість	Суб’єктивність у визначенні ваг, складність моделювання

Однією з ключових наукових проблем, пов’язаних з оцінюванням ефектів цифровізації, є так званий «парадокс продуктивності» інформаційних технологій. Ще у 1990-х роках Бріньолфссон звернув увагу на те, що, попри значні інвестиції в IT, у макро- та галузевій статистиці тривалий час не спостерігався відповідний приріст продуктивності. Подальші дослідження на рівні фірм показали, що при використанні більш детальних даних та адекватних методик оцінювання інвестиції в IT і цифрові технології дають істотний позитивний внесок у випуск і продуктивність, але їх ефекти залежать від наявності комплементарних організаційних змін – реінжинірингу процесів, навчання персоналу, змін у структурі управління.

У кількісному вимірі економічні ефекти цифровізації часто оцінюють через:

– виробничі функції типу Cobb–Douglas або транслог-функції, де в якості одного з факторів виступає капітал у ІКТ/цифрові активи; еластичність випуску за цим фактором показує маржинальний ефект від додаткових інвестицій;

– аналіз тотальної факторної продуктивності (TFP), де цифровізація розглядається як джерело зміни ефективності використання сукупних ресурсів;

– аналіз фінансових коефіцієнтів у динаміці (DuPont-розкладання рентабельності власного капіталу, маржинальності, оборотності активів), де цифровізація інтерпретується як фактор, що змінює структуру доходів і витрат.

Бенедек з колегами, застосовуючи DuPont-фреймворк до вибірки європейських компаній, показали, що вплив цифровізації на фінансові результати проявляється з часовим лагом: упровадження цифрових технологій у короткостроковій перспективі часто знижує рентабельність (через зростання амортизації й операційних витрат), але в середньостроковій – підвищує ефективність використання активів та операційну маржу [36]. Це підтверджує необхідність врахування часової динаміки при оцінюванні економічних ефектів IoT-проєктів.

Типовий часовий профіль витрат і вигод від цифровізації та впровадження IoT представлено на рисунку 1.4.

Особливістю IoT-проєктів є високий рівень невизначеності щодо майбутніх вигод, можливість поетапного впровадження та гнучкість управлінських рішень (відкласти, розширити, модифікувати, припинити проєкт). У таких умовах класичні методи NPV/IRR можуть недооцінювати стратегічну цінність цифрових ініціатив. Це зумовило поширення методології реальних опціонів (Real Options) для оцінювання IT-та цифрових інвестицій.

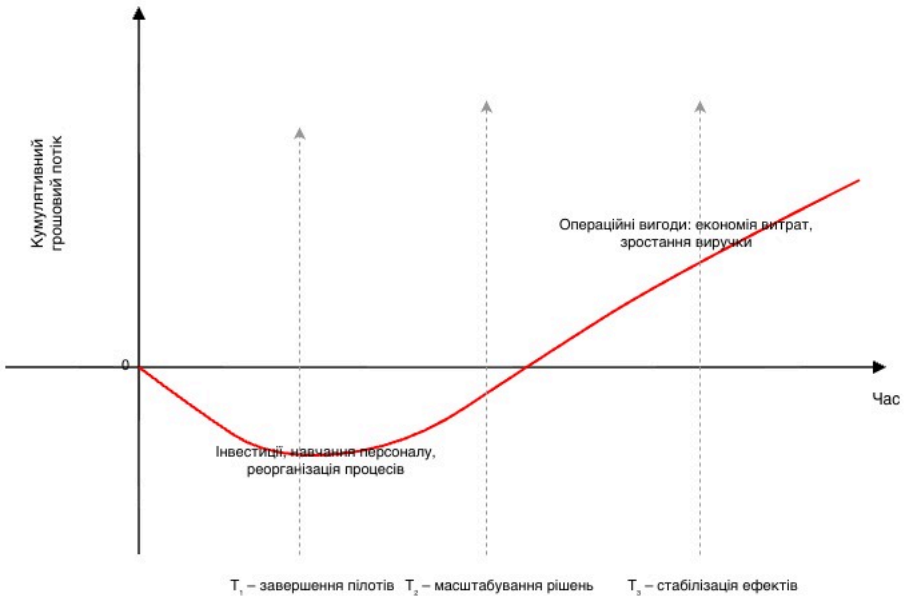


Рисунок 1.4 – Типовий часовий профіль витрат і вигод від цифровізації та впровадження IoT (концепція «J-кривої»)

У роботі Balasubramanian розроблено формальну методологію застосування реальних опціонів до інвестицій у IT-інфраструктуру: цифровий проєкт розглядається як набір опціонів на розширення, скорочення або відстрочку, вартість яких обчислюється за модифікованими фінансовими моделями (наприклад, Блека–Шоулза). Lozano-Almansa показує доцільність використання опціону відстрочки при впровадженні хмарних ERP-систем: підприємство може відкласти остаточне рішення до моменту зниження невизначеності щодо ринкових умов, технологічних стандартів або власної готовності [37]. Surzhikov акцентує увагу на гнучкості управління інноваційними проєктами, де реальні опціони поєднуються з деревами рішень і класичним NPV, що дозволяє приймати більш зважені інвестиційні рішення за умов високих ризиків [38].

Крім реальних опціонів, у літературі виокремлюють підходи, орієнтовані на ризик та кібербезпеку. Radanliev та співавт. пропонують методику економічної оцінки кіберризиків IoT, де застосовуються модифіковані NPV та ROI, що враховують очікувані збитки від кіберінцидентів, вартість заходів кіберзахисту та нематеріальні ефекти, пов’язані з довірою клієнтів. Таким чином,

частина економічного ефекту IoT-проєктів полягає не лише у створенні нової вартості, а й у зменшенні потенційних втрат.

У табл. 1.9 наведено порівняльну характеристику традиційного дисконтованого підходу та методології реальних опціонів у контексті цифрових та IoT-проєктів.

Таблиця 1.9 – Порівняння NPV-підходу та методології реальних опціонів для цифрових проєктів

Критерій	Класичний NPV-підхід	Підхід реальних опціонів
Урахування невизначеності	Невизначеність відображається через ставку дисконту та сценарний аналіз	Невизначеність моделюється явно через волатильність та ймовірнісні сценарії
Гнучкість управління	Припускається фіксований сценарій реалізації проєкту	Враховуються опції відстрочки, розширення, скорочення, припинення
Оцінка стратегічної цінності	Обмежена; «опція на майбутнє» не відображається у NPV	Можливо врахувати цінність доступу до нових ринків, платформ, даних
Складність застосування	Відносно простий для практиків	Потребує додаткових моделей, експертних оцінок, інколи складний для комунікації
Доцільність для IoT-проєктів	Підходить для зрілих, добре визначених проєктів з передбачуваними потоками	Більш адекватний для пілотних, модульних, інноваційних IoT-ініціатив з високою невизначеністю

Міжнародні організації та консалтингова спільнота запропонували низку практичних фреймворків, що поєднують описані вище підходи. Зокрема, McKinsey у своїх дослідженнях Industry 4.0 пропонує оцінювати економічні ефекти на основі карти цінності (value tree), де цифрові ініціативи прив’язуються до конкретних KPI (продуктивність, якість, час циклу, енергоефективність), а далі – до фінансових результатів (EBIT, грошовий потік) [38]. Для кожного кейсу lighthouse-фабрик у звітах World Economic Forum наведено кількісні оцінки: скорочення незапланованих простоїв до 50 %, зменшення часу циклу замовлення на 30–70 %, зменшення споживання енергії на 10–30 % та ін. [39, 40].

Концептуальна модель оцінювання економічного ефекту IoT-проєктів представлена на рисунку 1.5.

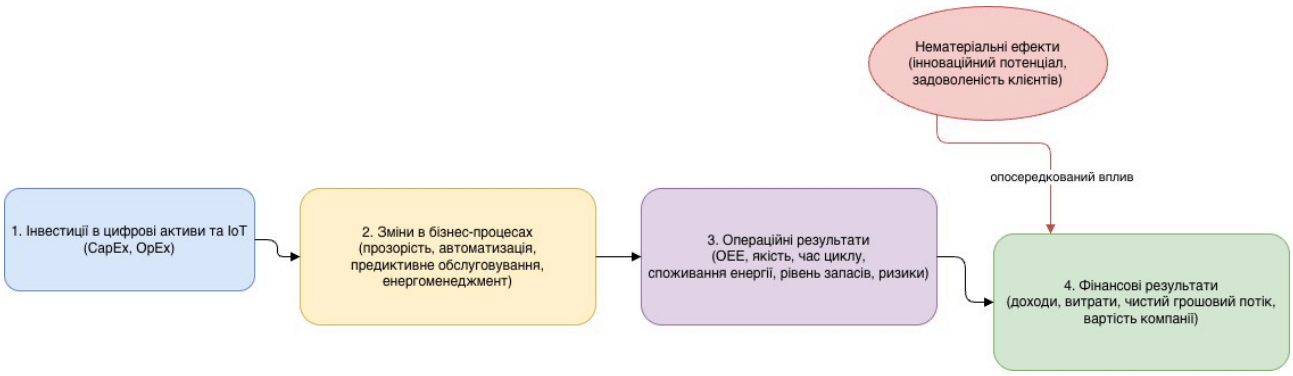


Рисунок 1.5 – Концептуальна модель оцінювання економічного ефекту IoT-проєктів

Останні оглядові праці з економіки Industry 4.0 підкреслюють, що ефекти цифровізації не обмежуються внутрішньою ефективністю підприємства: у довгостроковій перспективі вони сприяють формуванню нових бізнес-моделей (сервітизації, «продажу результату» замість обладнання), розвитку платформ і екосистем, що також мають бути враховані в оцінці економічних наслідків.

Таким чином, теоретичні підходи до оцінювання економічних ефектів цифровізації та IoT можна звести до кількох груп:

– традиційні фінансові методи (ROI, NPV, IRR, PP, TCO), адаптовані до структури витрат і вигод цифрових проєктів;

– моделі продуктивності та фінансового аналізу (виробничі функції, TFP, DuPont-аналіз), що дозволяють вимірювати вплив цифровізації на операційні й фінансові показники;

– розширені методи з урахуванням невизначеності та опційності (реальні опціони, сценарний аналіз, оцінка кіберризиків);

– багатокритеріальні та практичні фреймворки (MCDM-підхід, value tree, карти KPI), що інтегрують фінансові й нефінансові аспекти.

1.4. Висновки до розділу 1

У першому розділі узагальнено теоретико-методологічні засади дослідження економічних ефектів впровадження Інтернету речей у бізнес-

процеси промислових підприємств. Показано, що IoT є базовою технологією Індустрії 4.0, яка забезпечує перехід від фрагментарної автоматизації окремих операцій до інтегрованого управління виробництвом, логістикою, енергетикою та сервісом на основі даних у реальному часі. Інтернет речей забезпечує формування «цифрової тіні» обладнання, технологічних ліній, продукції та ресурсних потоків, що створює передумови для побудови кіберфізичних систем, цифрових двійників та впровадження моделей предиктивного управління. Систематизовано ключові тренди розвитку глобального ринку IIoT і доведено, що саме промисловість є одним із основних реципієнтів економічних вигод від цієї технології.

Розкрито сутність та структуру бізнес-процесів промислового підприємства як об’єкта цифрового вдосконалення. На основі аналізу наукових підходів бізнес-процес запропоновано трактувати як стійку, керовану та вимірювану послідовність взаємопов’язаних дій і управлінських рішень, що перетворюють ресурси у продукцію та послуги з визначеною цінністю для стейкхолдерів. Виділено основні, забезпечувальні, управлінські та інноваційно-розвиткові процеси, для яких окреслено типові показники результативності (OEE, рівень запасів, енергоспоживання, якість, гнучкість виробництва). Показано, що саме ці процеси є основними «точками прикладання» IoT: онлайн-моніторинг стану обладнання, предиктивне обслуговування, смарт-логістика, енергоменеджмент 4.0, системи простежуваності продукції та моніторингу безпеки. Наведені узагальнення міжнародних досліджень свідчать, що впровадження IoT здатне забезпечити суттєве скорочення простоїв і витрат на ремонт, зниження енергоспоживання, зменшення браку та підвищення продуктивності праці.

Систематизовано теоретичні підходи до оцінювання економічних ефектів цифровізації та впровадження IoT. Економічні результати поділено на прямі (зниження витрат, зростання доходів), опосередковані (зміна ризиків, гнучкості, стійкості ланцюга створення вартості) та нематеріальні (інноваційний потенціал, якість даних, задоволеність клієнтів). Розглянуто традиційні фінансові методи

(ROI, NPV, IRR, період окупності, TCO) та показано особливості їх адаптації до цифрових проєктів, де значна частина ефектів має відкладений та опосередкований характер. Окрему увагу приділено моделям оцінювання впливу цифровізації на продуктивність (виробничі функції, TFP, DuPont-аналіз) і розширеним підходам – методології реальних опціонів та оцінюванню кіберризиків, що дозволяють враховувати невизначеність і гнучкість управлінських рішень.

Впровадження IoT у бізнес-процеси промислових підприємств слід розглядати як інвестиційний проєкт комплексної цифрової трансформації, економічні наслідки якого формуються на перетині технологічних можливостей і змін в організації процесів.

РОЗДІЛ 2
МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ НА БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ТА РЕЗУЛЬТАТИВНІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

2.1 Концепція моделювання впливу інтернету речей на бізнес-процеси підпрємства

Цифрова трансформація промисловості передбачає не лише впровадження нових технологій, а й переосмислення логіки бізнес-процесів, способів прийняття рішень та системи показників результативності. У більшості сучасних підходів Інтернет речей (Internet of Things, IoT) розглядається як ключовий елемент інтелектуального виробництва, який забезпечує безперервний збір даних з обладнання, матеріальних потоків та середовища, інтеграцію цих даних у бізнес-процеси й формування нових економічних ефектів [41]. Для того щоб оцінити вплив IoT на діяльність підприємства, недостатньо описати окремі проєкти цифровізації; необхідно побудувати цілісну концепцію моделювання, що пов’язує технологічну інфраструктуру, структуру бізнес-процесів та систему показників ефективності.

У сучасній науковій літературі простежуються два взаємодоповнюючі напрями: по-перше, розроблення концептуальних рамок цифрової трансформації виробництва на основі бізнес-процес-менеджменту (Business Process Management, BPM); по-друге, створення спеціалізованих моделей IoT-орієнтованих процесів, які враховують потоки даних, подій та взаємодію з «розумними» об’єктами. Дослідження J. Butt пропонує інтегровану BPM-рамку для Industry 4.0, де цифрові технології (у тому числі IoT) вплітаються в цикл «опис – аналіз – удосконалення – контроль» бізнес-процесів, а оцінка економічних ефектів ґрунтується на зміні витрат, продуктивності, гнучкості та якості [41]. У роботах S. Schönig та співавт. показано, що для відображення впливу IoT доцільно розширювати традиційні нотації процесного моделювання

додатковими елементами – сенсорами, актуаторами, потоками телеметричних даних, контекстними подіями [42].

Подальший розвиток цих ідей демонструє модельно-орієнтована рамка IoT-aware BPM, запропонована P. Bocciarelli та колегами [43]. Автори пропонують поєднувати метамодель IoT-систем з моделями бізнес-процесів у середовищі Model-Driven Engineering, що дає змогу автоматично генерувати симуляційні моделі, пов’язані з параметрами реальних пристроїв. Такий підхід критично важливий для економічного аналізу: підприємство може проводити «що-якщо»-експерименти, оцінюючи варіанти інвестицій у IoT-інфраструктуру з точки зору часу виконання процесів, рівня простоїв, споживання енергії тощо.

З іншого боку, дослідження з управління ланцюгами постачання демонструють, що оцінка впливу IoT має будуватися не лише на операційних, а й на стратегічних ефектах. Концептуальна рамка M. Ben-Daya та співавт. показує, що IoT трансформує ланцюг постачання через підвищення прозорості, можливість прогнозного обслуговування, створення нових сервісних моделей і зниження сукупних логістичних витрат [44]. Ефекти класифікуються за блоками: ефективність операцій, рівень обслуговування клієнтів, інноваційність та стійкість, що логічно переноситься й на внутрішні бізнес-процеси промислового підприємства.

Узагальнення існуючих підходів дає змогу виділити кілька основних напрямів моделювання впливу IoT на бізнес-процеси (табл. 2.1).

Узагальнена концепція моделювання повинна інтегрувати перелічені напрями, дозволяючи описати шлях від IoT-пристрою до економічного результату. На концептуальному рівні модель доцільно будувати як багаторівневу систему, де кожен рівень відповідає на власне питання: що відбувається у фізичному середовищі, як це відображається на бізнес-процесах, які показники змінюються та який економічний ефект досягається.

Таблиця 2.1 – Основні підходи до моделювання впливу IoT на бізнес-процеси підприємства

Підхід	Характеристика	Приклади застосування
Процесно-орієнтоване моделювання (BPM, BPMN-розширення)	Опис логіки бізнес-процесів із включенням IoT-подій, сенсорів, акторів; акцент на управлінні потоками робіт та даних	Рамки BPM для цифрової трансформації виробництва; IoT-enhanced процесні моделі
Модельно-орієнтовані та симуляційні підходи	Побудова формальних моделей IoT-орієнтованих процесів і їх симуляція; можливість аналізу сценаріїв та оптимізації	Model-driven framework для IoT-aware BPM з автоматичною генерацією симуляційних моделей
Підходи на основі показників (performance measurement systems)	Визначення системи KPI, що відображають ефекти цифровізації; побудова зв'язку «IoT-ініціативи – зміна показників – економічний результат»	Система вимірювання ефективності Industry 4.0-виробництва (SMPMS)
Моделі зрілості та готовності до IoT	Оцінювання рівня впровадження IoT та цифрових практик за набором критеріїв; зіставлення рівня зрілості з результативністю	Огляди та класифікації моделей зрілості підприємств щодо IoT
Інтегровані економіко-математичні моделі	Поєднання процесних, показникових та фінансових моделей; розрахунок інтегральних економічних ефектів (NPV, ROI, TCO)	Економічні оцінки інвестицій у цифрові технології й реінжиніринг процесів на основі даних IoT

На першому рівні формується модель IoT-інфраструктури: типи пристроїв, канали зв'язку, протоколи, сервіси збору та зберігання даних. У дослідженнях з інтелектуального виробництва IoT розглядається разом із кіберфізичними системами та хмарними платформами як ключовий технологічний enabler інтегрованого та інтелектуального виробництва. Саме цей рівень визначає можливості щодо частоти збору даних, масштабованості та надійності, що впливають на якість моделювання бізнес-процесів.

Другий рівень пов'язаний із структурою бізнес-процесів. Використання BPM-підходу передбачає декомпозицію діяльності підприємства на основні процеси (виробничі, логістичні, сервісні, управлінські) з виокремленням операцій, де IoT-дані можуть створювати додану цінність. У процесних моделях фіксуються точки інтеграції IoT: автоматичний збір технологічних параметрів, тригерні події, що запускають обслуговування, аналітичні сервіси прогнозування відмов тощо.

Третій рівень концепції пов’язаний із системою показників, які використовуються для оцінки впливу цифровізації. Дослідження S. Kamble та співавт. пропонують Smart Manufacturing Performance Measurement System (SMPMS), яка включає десять вимірів результативності: вартість, якість, гнучкість, час, інтеграцію, продуктивність, діагностику й прогнозування, обчислювальні можливості, соціальну та екологічну стійкість [44]. Така логіка дає змогу безпосередньо пов’язувати функції IoT (наприклад, онлайн-моніторинг чи прогнозне обслуговування) зі зміною відповідних показників (скорочення часу простоїв, зниження браку, енергоємності).

Четвертий рівень стосується оцінки зрілості та ефективності впровадження IoT на рівні підприємства. Огляд A. Solis Pino та співавт. показує, що існуючі моделі зрілості IoT базуються на комбінації технологічних, організаційних, людських і результативних вимірів; вони дозволяють визначати вихідний рівень підприємства, планувати цілі цифрової трансформації та контролювати прогрес [46]. Включення показників зрілості до концепції моделювання дає змогу враховувати не лише прямий ефект окремих IoT-проєктів, а й довгострокову еволюцію організаційних компетенцій.

Базуючись на аналізі літератури, доцільно представити інтегровану концептуальну схему моделювання впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства (рис. 2.1).

З погляду методології, концепція моделювання має спиратися на комбінування якісних та кількісних методів. На початкових етапах доцільно використовувати якісний аналіз процесів та експертні оцінки для ідентифікації ключових точок впливу IoT, формування карти бізнес-процесів і матриці «технологія – процес – показник». Подальший етап передбачає кількісне моделювання: застосування симуляційних моделей для аналізу варіантів реорганізації процесів, побудову системи показників за принципами SMPMS, розроблення економіко-математичних моделей оцінки інтегральних ефектів (регресійні, панельні моделі, моделі загальної вартості володіння тощо).

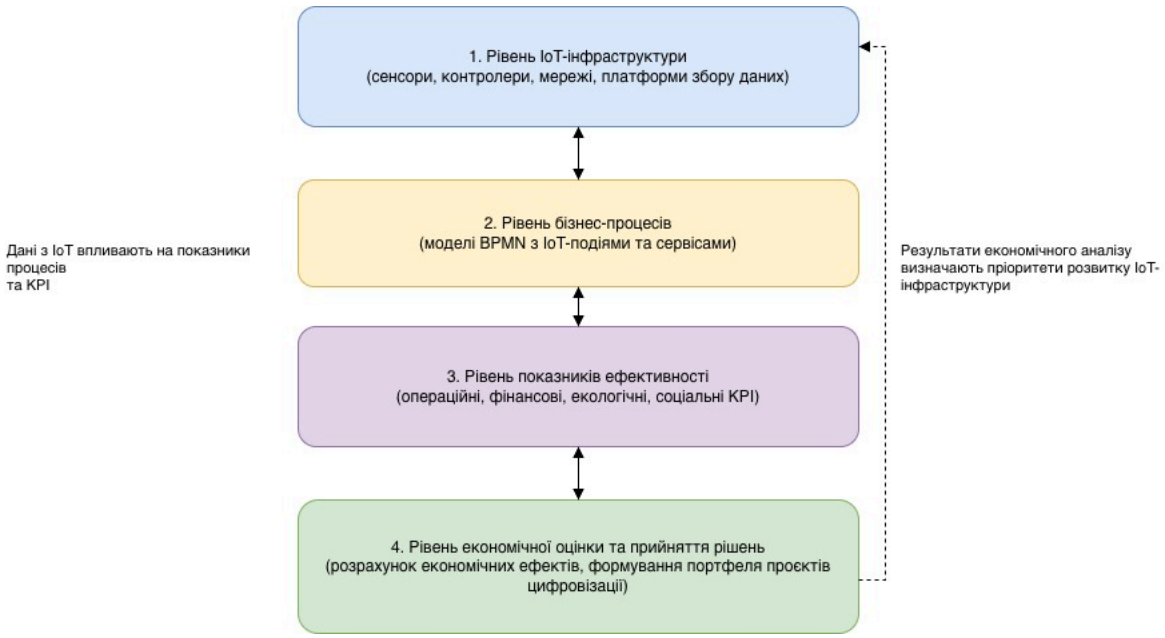


Рисунок 2.1 – Концептуальна схема моделювання впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства

При цьому важливо враховувати галузеву специфіку промислового підприємства. У роботах з інтелектуального виробництва підкреслюється, що структури процесів, види ресурсів та вимоги до показників можуть істотно відрізнятися між дискретним та процесним виробництвом, між масовим випуском і проектним виробництвом. Концепція моделювання повинна бути достатньо гнучкою, щоб адаптуватися до різних видів діяльності, але водночас зберігати єдину логіку побудови зв’язку «IoT – процес – показник – економічний результат».

Ще одним принциповим елементом концепції є цикл безперервного вдосконалення. IoT забезпечує постійний потік даних про стан обладнання, якість продукції, поведінку клієнтів, логістичні затримки тощо. Це дає змогу не лише одноразово оцінити ефекти від впровадження технології, а й періодично оновлювати параметри моделі, виявляти відхилення від очікуваних результатів, коригувати бізнес-процеси й інвестиційні рішення. Підхід «data-driven BPM», який поєднує аналіз подієвих журналів процесів і потоки IoT-даних, розглядається як один із ключових напрямів розвитку BPM у контексті Industry 4.0.

Таким чином, концепція моделювання впливу Інтернету речей на бізнес-процеси промислового підприємства має ґрунтуватися на таких засадах:

– процесно-орієнтоване бачення діяльності підприємства із чіткою ідентифікацією точок інтеграції IoT;

– багаторівнева структура моделі, що пов’язує IoT-інфраструктуру, бізнес-процеси, систему показників і економічну оцінку;

– використання системи показників, адаптованої до специфіки Industry 4.0 та розширеної вимірюваннями стійкості;

– урахування рівня зрілості підприємства щодо IoT та цифрової трансформації [7];

– поєднання якісних і кількісних методів, включно з симуляційним моделюванням та економіко-математичними моделями.

Сформована концепція створює методологічну основу для подальшої розробки конкретної кількісної моделі оцінювання економічних ефектів IoT та її апробації на промисловому підприємстві.

2.2. Побудова економіко-математичної моделі оцінювання економічних ефектів впровадження IoT

Кількісна оцінка економічних результатів упровадження Інтернету речей у виробничі системи вимагає формалізованої моделі, яка поєднує технологічні показники бізнес-процесів із фінансовими результатами підприємства. Міжнародні дослідження з оцінювання інвестицій у технології Industry 4.0 підкреслюють, що без прозорої процедури кількісної оцінки компанії стримано ставляться до впровадження цифрових рішень, незважаючи на очевидний потенціал підвищення продуктивності й гнучкості виробництва. Сучасні моделі здебільшого орієнтовані на класичні методи інвестиційних розрахунків (NPV, IRR, ROI) або на часткові оцінки окремих ефектів (економія ресурсів, зменшення простоїв), що зумовлює потребу в інтегрованій економіко-математичній моделі для промислових підприємств.

Систематичний огляд моделей оцінювання цифровізації та Industry 4.0 показує, що найбільш перспективними є підходи, які поєднують: (1) опис IoT-проєкту як інвестиційного об'єкта; (2) формалізацію впливу на операційні показники; (3) перерахунок змін у грошові потоки; (4) оцінку інтегральних фінансових та нефінансових ефектів. Для IoT-рішень важливо враховувати не лише прямі ефекти (економія витрат, зростання випуску), а й побічні результати – зниження ризиків аварій, підвищення якості даних, можливості подальшої цифрової трансформації.

Базою для побудови моделі є представлення IoT-проєкту як інвестиції в комплекс апаратно-програмних засобів, які змінюють параметри ключових бізнес-процесів виробництва. Узагальнено структуру вхідних і вихідних параметрів моделі наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Структура вхідних та вихідних параметрів економіко-математичної моделі оцінювання ефектів IoT

Група параметрів	Позначення	Зміст
Інвестиційні витрати	I_0, I_t	Первісні капітальні вкладення в IoT-інфраструктуру (сенсори, мережеве обладнання, ПЗ, інтеграція) та додаткові інвестиції впродовж періоду t
Операційні витрати	$C_{0t,}\ C_{1t,}$	Сукупні витрати підприємства до (0) та після (1) впровадження IoT у році t (матеріали, енергія, ремонт, персонал тощо)
Виробничі показники	$Q_{0t,}\ Q_{1t,}$	Обсяги випуску продукції до та після впровадження IoT у році t
Показники якості й надійності	d_t, s_t, u_t	Частка браку, частка простоїв, коефіцієнт використання обладнання (OEE)
Цінові параметри	P_t	Середня ціна реалізації продукції у році t
Грошові потоки	$F_{0t,}\ F_{1t,}$	Грошові потоки підприємства до та після впровадження IoT
Інтегральні показники ефективності	NPV, IRR, ROI, PI	Чиста приведена вартість, внутрішня норма дохідності, рентабельність інвестицій, індекс прибутковості IoT-проєкту

На основі табл. 2.2 розробляється структурно-логічна схема економіко-математичної моделі (рис. 2.2), в якій IoT-рішення розглядається як блок, що трансформує початкові параметри бізнес-процесів (простої, споживання енергії, тривалість виробничого циклу, рівень браку) у змінені показники витрат та

доходів. Подібний підхід пропонують Joppen та ін., які описують інвестицію в Industry 4.0 як систему, пов'язану з іншими підсистемами виробництва та логістики, і наполягають на необхідності поетапного аналізу впливу на показники продуктивності та фінансів.

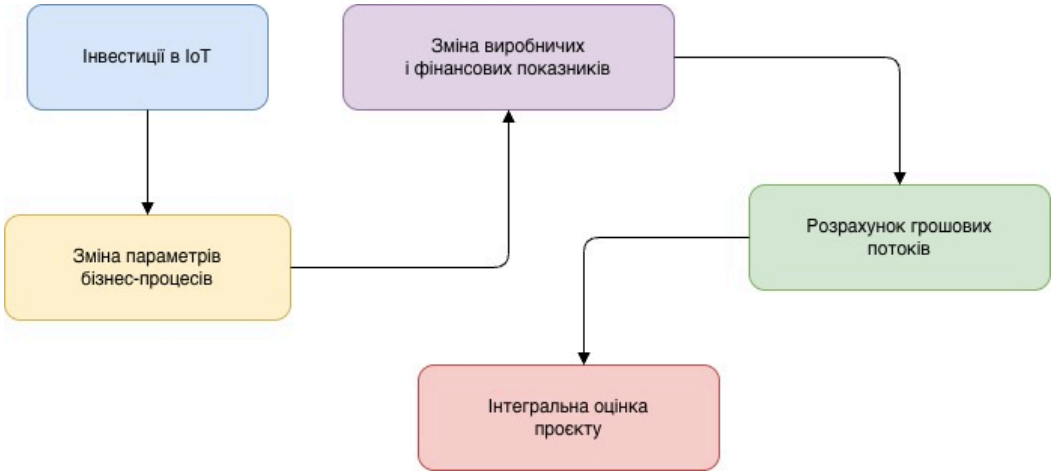


Рисунок 2.2 – Структурно-логічна модель економіко-математичної оцінки економічних ефектів впровадження IoT

Першим кроком є опис зміни виробничих показників під впливом IoT. Для ключових показників бізнес-процесів K_i (OEE, тривалість простоїв, частка браку, середній час ремонтів, питомі витрати енергії тощо) вводиться вектор K_{0jt} – значення до впровадження, та K_{1jt} – після впровадження в році t. Вплив IoT відображається у вигляді відносних змін:

$$\Delta K_{jt} = \frac{K_{1jt} - K_{0jt}}{K_{0jt}}, \quad j = 1, \dots, m. \tag{2.1}$$

Економічні дослідження показують, що інтеграція IoT-сенсорів і систем моніторингу може зменшити незаплановані простої обладнання на 30–40 %, підвищити продуктивність виробництва на 15–25 % та знизити витрати на технічне обслуговування на 10–20 % завдяки переходу до предиктивного

ремонту. Ці результати задають орієнтовні діапазони для параметрів ΔK_{jt} у сценарному моделюванні.

Наступний етап – перехід від техніко-експлуатаційних показників до зміни витрат та доходів. Для кожного показника K_j вводяться коефіцієнти чутливості α_j та β_j, що відображають вплив на операційні витрати та обсяг випуску відповідно:

$$\Delta C_t = \sum_{j=1}^{m} \alpha_j \ \Delta K_{jt}, \tag{2.2}$$

$$\Delta Q_t = \sum_{j=1}^{m} \beta_j \Delta K_{jt}. \tag{2.3}$$

Коефіцієнти α_j, β_j можуть визначатися на основі фактичних даних підприємства (регресійний аналіз, еластичності) або експертним шляхом. Подібний підхід застосовують при моделюванні впливу цифровізації та маркетингових цифрових інструментів на економічні результати підприємств, де формують систему показників та ваг для інтегрального індексу.

З урахуванням зміни обсягів виробництва та витрат грошові потоки від IoT-проєкту в році ttt описуються як:

$$\Delta CF_t = P_t \cdot \Delta Q_t - \Delta C_t - I_t, \tag{2.4}$$

де I_t – додаткові інвестиційні витрати в році t (ліцензії ПЗ, модернізація обладнання, навчання персоналу).

Інтегральний фінансовий ефект визначається через чисту приведену вартість (NPV) IoT-проєкту:

$$NPV_{IoT} = -I_0 + \sum_{t=1}^{T} \frac{\Delta CF_t}{(1+r)^t}, \quad (2.5)$$

де

I_0 – початкові інвестиції;

T – горизонт планування;

r – ставка дисконту (середньозважена вартість капіталу підприємства або галузевий норматив).

Такий підхід відповідає загальноприйнятим методикам інвестиційних розрахунків, які застосовуються в оцінці проєктів цифровізації енергетики, логістики й виробництва.

Для порівняння альтернативних IoT-рішень доцільно використовувати також відносні показники:

$$ROI_{IoT} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \frac{\Delta CF_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^{T} I_t}, \quad (2.6)$$

$$PI_{IoT} = \frac{\sum_{t=1}^{T} \frac{\Delta CF_t}{(1+r)^t}}{I_0}, \quad (2.7)$$

а також строк окупності інвестицій (Payback Period), який визначається моментом, коли кумулятивна сума $\sum_{t=1}^{\tau} \Delta CF_t$ стає невід'ємною.

З огляду на багатовимірність результатів цифровізації (фінансові, операційні, ризикові, соціальні та екологічні аспекти) доцільно сформувати інтегральний показник економічних ефектів впровадження IoT. У літературі пропонуються моделі інтегральних індексів, де часткові показники нормуються, зважуються та агрегуються в єдиний індикатор, який відображає сукупний ефект цифрових технологій для підприємства.

У рамках магістерського дослідження інтегральний показник пропонується розраховувати за формулою:

$$E_{IoT} = \sum_{k=1}^{n} w_k \, z_k, \tag{2.8}$$

де

z_k – нормовані значення часткових показників (наприклад, z_1 – відносний приріст NPV, z_2 – скорочення строку окупності, z_3 – відносне зниження собівартості, z_4 – приріст OEE, z_5 – зменшення частоти аварійних зупинок);

w_k – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритети підприємства. Ваги можуть визначатися експертним методом, методом аналізу ієрархій або ентропійним підходом.

Для нормування можна використати лінійну трансформацію:

$$z_k = \frac{x_k - x_k^{\min}}{x_k^{\max} - x_k^{\min}}, \tag{2.9}$$

де

x_k – фактичне значення показника для розглянутого варіанту IoT-проєкту;

x_k^{min}, x_k^{max} – мінімальне та максимальне значення показника серед усіх аналізованих варіантів (або цільові/еталонні значення). Для показників «витратного» типу (наприклад, строк окупності) використовується обернене нормування.

У табл. 2.3 наведено приклад системи часткових показників, що можуть входити до інтегрального індексу E_{IoT}.

Таблиця 2.3 – Приклад системи часткових показників інтегрального індексу економічних ефектів IoT

Показник	Позначення	Тип впливу	Коротка характеристика
Приріст чистої приведеної вартості	NPV_{rel}	стимулюючий	Відношення NPV_{IoT} до початкових інвестицій I_0
Скорочення строку окупності	PB_{rel}	дестимулюючий	Відносна зміна строку окупності порівняно з базовим проєктом
Зменшення собівартості одиниці продукції	ΔSC	стимулюючий	Відносне зниження виробничої собівартості завдяки IoT
Приріст коефіцієнта OEE	ΔOEE	стимулюючий	Зміна загальної ефективності обладнання за рахунок моніторингу й предиктивного ремонту
Зниження частоти аварійних зупинок	ΔF_{fail}	стимулюючий	Відносне зменшення кількості аварійних відмов обладнання

Застосування інтегрального показника E_{IoT}. дозволяє порівнювати декілька альтернативних IoT-проєктів (наприклад, різні варіанти систем моніторингу обладнання, логістичних платформ, енергоменеджменту) не лише за фінансовими результатами, а й за ефектом на надійність, якість та стійкість виробничої системи. Подібні інтегральні індикатори активно використовуються в дослідженнях цифрової трансформації підприємств та в оцінюванні економічної доцільності впровадження IoT у системах точного землеробства, енергетиці й промисловому виробництві.

Важливою особливістю інвестицій у IoT є висока невизначеність параметрів – вартості обладнання, швидкості масштабування, темпів зростання ефектів. У працях, присвячених економічній оцінці Industry 4.0, пропонується використовувати сценарний аналіз і чутливісний аналіз параметрів моделі, а також постановку задач оптимізації із застосуванням лінійного та цілочислового програмування для вибору оптимального набору цифрових технологій.

У межах магістерської роботи доцільно реалізувати три сценарії: оптимістичний, базовий і стриманий. Для кожного сценарію задаються різні значення ΔK_{jt}, P_t, r, обсягів інвестицій I_t. На основі рівнянь (2.1)–(2.9) обчислюються NPV_{IoT}, ROI_{IoT}, PI_{IoT}, строк окупності та інтегральний індекс

E_{IoT}. Порівняння результатів за сценаріями дозволяє оцінити стійкість економічних ефектів до змін зовнішніх умов і внутрішніх параметрів проєкту.

2.3. Інформаційне забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів

Економіко-математична модель оцінювання ефектів впровадження IoT, описана в попередньому підрозділі, базується на системі показників, які відображають зміну параметрів бізнес-процесів, витрат та фінансових результатів підприємства. Щоб така модель була працездатною, необхідно сформувати цілісне інформаційне забезпечення: визначити джерела даних, побудувати архітектуру їх інтеграції, забезпечити якість, повноту та доступність інформації для розрахунків і аналітики. Світовий досвід цифровізації промисловості підтверджує, що саме питання даних – їх збирання, зберігання, очищення та контекстуалізація – стає ключовим бар'єром на шляху до ефективного використання IoT та аналітики в рамках Industry 4.0 [47].

У контексті промислового підприємства інформаційне забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів IoT формують кілька основних груп даних:

1. Дані від IoT-пристроїв та виробничої автоматики. До них належать часові ряди показників роботи обладнання (температура, тиск, вібрації, струм, напруга, стан приводів), сигнали стану (включено/вимкнено, аварія, простій), дані лічильників та датчиків енергоспоживання, показники якості продукції, зчитувані в процесі виробництва.

2. Операційні дані MES/SCADA-систем. Це інформація про виконання виробничих замовлень, маршрути проходження партій, тривалість операцій, фактичні графіки завантаження робочих центрів, журнали простоїв і причин зупинок, дані про використання матеріалів та напівфабрикатів.

3. Дані ERP-, CRM- та фінансово-облікових систем. Вони відображають обсяги реалізації, ціни, витрати за статтями (матеріали, енергоносії, ремонт, зарплата), структуру собівартості, інвестиційні витрати, доходи та грошові

потоки, інформацію про клієнтів, претензії щодо якості. Саме ці дані використовуються для розрахунку показників NPV, ROI, періоду окупності тощо.

4. Дані систем енергоменеджменту, технічного обслуговування та охорони праці. Вони містять статус і графіки ремонту обладнання, журнали аварій та інцидентів, інформацію про використання енергоресурсів, показники викидів та екологічних впливів.

5. Зовнішні дані. До цієї групи належать ринкові ціни на ресурси та продукцію, галузеві бенчмарки продуктивності, нормативні обмеження, курси валют, які можуть бути потрібні для сценарного аналізу й переведення ефектів у порівнянні величини [48].

Узагальнену структуру джерел даних, що використовуються для підтримки економіко-математичної моделі, наведено в табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні джерела даних для моделі оцінювання економічних ефектів IoT

Група даних	Типові системи-джерела	Приклади параметрів	Використання в моделі
Дані IoT та автоматики	Сенсори, контролери PLC, шлюзи IoT, системи збору телеметрії	Температура, вібрації, тиск, стан обладнання, лічильники енергії	Розрахунок показників OEE, часу простоїв, енергоємності; оцінка впливу IoT на технічні параметри процесів
Операційні дані виробництва	MES, SCADA, APS	Час виконання операцій, маршрути, обсяги випуску, журнали простоїв, причини зупинок	Формування показників продуктивності, гнучкості, використання потужностей
Фінансово-економічні дані	ERP, бухгалтерські системи, CRM	Собівартість, витрати за статтями, доходи від реалізації, ціни, грошові потоки	Розрахунок NPV, ROI, періоду окупності, економії витрат
Дані техобслуговування та безпеки	CMMS, EAM, системи HSE	Графіки TOiP, тривалість ремонтів, аварії, інциденти, нещасні випадки	Оцінка ефекту від предиктивного обслуговування, зниження ризиків і простоїв
Зовнішні джерела	Галузева статистика	Ціни на сировину та енергію, галузеві бенчмарки, курси валют	Сценарний аналіз, порівняння з еталонами, прогнозні розрахунки

Для частини завдань моделі потрібні не агреговані показники, а подієві журнали (event logs), що описують фактичне виконання процесів – послідовність операцій, час їх початку й завершення, пов'язані ресурси. У роботах з процес-майнінгу для «розумних» фабрик показано, що включення IoT-даних у подієві журнали (IoT-enriched event logs) суттєво підвищує точність аналізу й виявлення вузьких місць [49]. Такі журнали можуть безпосередньо використовуватися для калібрування параметрів моделі (ΔK_{jt}, коефіцієнтів чутливості, розподілів тривалості операцій).

Побудова інформаційного середовища для моделі оцінювання ефектів IoT повинна відповідати загальновизнаним стандартам інтеграції виробничих та управлінських систем. Міжнародний стандарт ISA-95 (IEC/ISO 62264) визначає багаторівневу архітектуру інтеграції «підприємство – виробництво» та описує моделі обміну даними між рівнями ERP (рівень 4), MES (рівень 3) та системами керування технологічними процесами (рівні 2–1) [50]. Використання принципів ISA-95 дозволяє уніфікувати обмін даними між різними системами, спростити побудову єдиних сховищ даних і забезпечити масштабованість рішення.

У рамках інформаційного забезпечення моделі доцільно виділити кілька шарів архітектури:

– шар збору даних, пристрої IoT, PLC, датчики, шлюзи, протоколи MQTT/OPC UA, що забезпечують збір і первинну фільтрацію даних з обладнання;

– шар оперативного управління, SCADA- та MES-системи, що агрегують дані з цехів, ведуть журнали подій, управляють виконанням виробничих замовлень;

– шар корпоративних даних, ERP, CRM, системи фінансового та управлінського обліку;

– аналітичний шар, сховище даних або «озеро даних» (data warehouse/data lake), інструменти бізнес-аналітики (BI), засоби процес-майнінгу та аналітики великих даних.

У літературі з архітектури великих даних для Industry 4.0 пропонуються багатошарові рішення, що включають рівні збору, інтеграції, зберігання, обробки та візуалізації даних [51]. Для промислових підприємств важливим є поєднання пакетної обробки (batch processing) історичних даних для стратегічних розрахунків (NPV, ROI, аналіз трендів) та потокової обробки (stream processing) даних IoT у режимі реального часу, що підтримує оперативне управління процесами.

Узагальнена архітектура інформаційного забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів IoT представлена на рис. 2.3

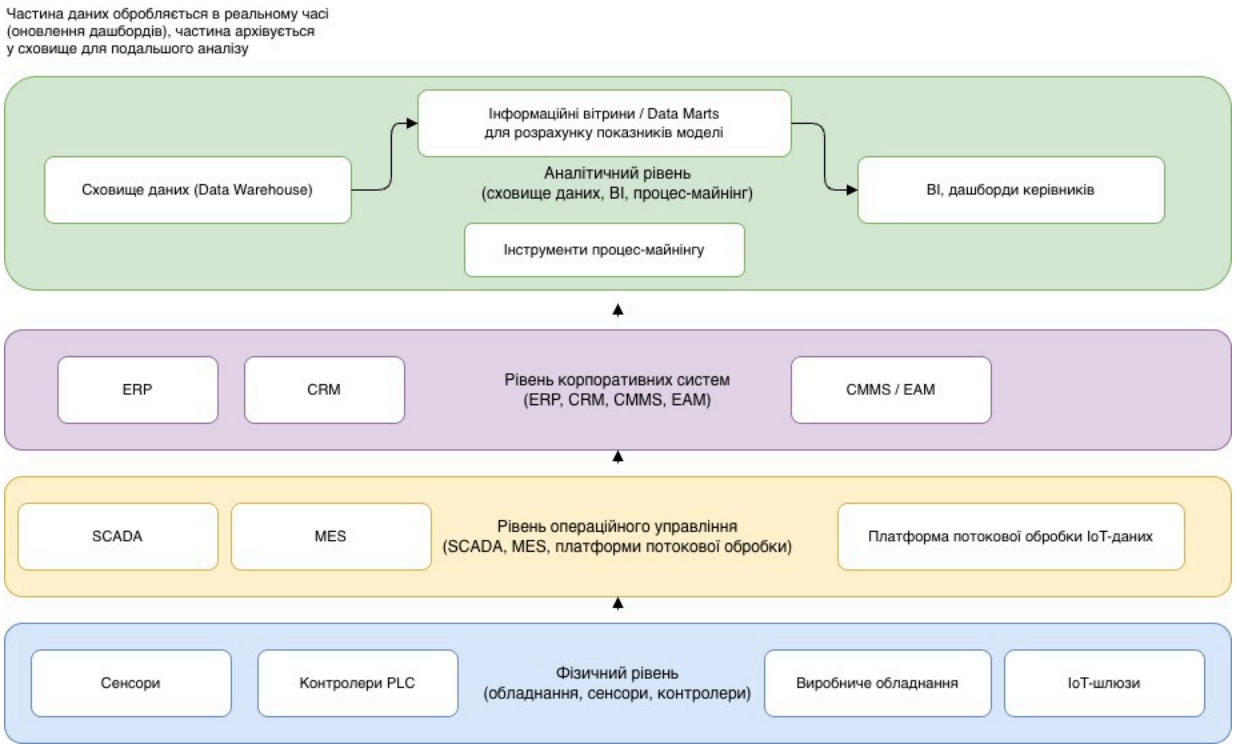


Рисунок 2.3 – Узагальнена архітектура інформаційного забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів IoT

Ключовою технологією інтеграції є процес ETL (Extract–Transform–Load), який забезпечує витягування даних з різнорідних джерел, їх очищення, уніфікацію та завантаження у сховище даних. Фахові огляди підкреслюють, що ETL є «серцем» бізнес-аналітики: він дозволяє об’єднати дані з виробничих,

логістичних, фінансових і маркетингових систем, усунути розбіжності у форматах і підготувати інформацію до аналітичних розрахунків. Для IoT-даних часто застосовується розширений підхід ELT/ETL із використанням потокових конекторів, що дає змогу опрацьовувати великі потоки телеметрії в режимі близькому до реального часу.

Ефективність будь-якої аналітичної моделі безпосередньо залежить від якості даних. Систематичні огляди підкреслюють, що в кіберфізичних системах та IoT-додатках Industry 4.0 проблеми якості даних – відсутність калібрування сенсорів, викиди, пропуски, латентність і шум – можуть істотно спотворювати результати аналізу та призводити до неправильних управлінських рішень.

Для інформаційного забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів впровадження IoT доцільно сформулювати такі основні вимоги до якості даних:

– точність (відповідність вимірювань реальним значенням, каліброваність сенсорів);

– повнота (наявність усіх необхідних полів і записів; відсутність систематичних пропусків у часових рядах);

– узгодженість (єдині довідники обладнання, номенклатури продукції, підрозділів; відсутність дублювання й конфліктів у даних з різних систем);

– своєчасність (достатня частота оновлення даних для підтримки розрахунків і оперативної аналітики);

– цілісність і трасованість (можливість простежити походження кожного показника – «data lineage» – від сенсора або первинного документа до агрегованих аналітичних метрик).

Окреслені вимоги реалізуються через комплекс заходів управління даними (data governance): розробку єдиних стандартів наіменування й кодування, опис метричних показників і бізнес-правил, призначення «власників даних» (data owners) у відповідальних підрозділах, впровадження процедур валідації та контролю якості при завантаженні даних у сховище. Практичні рекомендації з управління даними для промислових підприємств наголошують, що без

системного підходу до якості даних компанії не можуть повною мірою реалізувати потенціал IoT, великих даних та ШІ.

У табл. 2.5 представлено приклад матриці якості даних для ключових груп інформації, що використовується в моделі.

Таблиця 2.5 – Матриця вимог до якості даних для моделі оцінювання економічних ефектів IoT

Група даних	Ключові показники якості	Типові ризики	Основні заходи забезпечення
IoT-телеметрія	Точність, повнота, своєчасність	Налаштування сенсорів, втрата пакетів, шум, часові зсуви	Калібрування датчиків, фільтрація й агрегація сигналів, контроль «мертвих» сенсорів
Дані MES/SCADA	Узгодженість, трасованість	Некоректна реєстрація подій, дублікати записів	Стандарти подієвих журналів, автоматизований збір подій, валідація логічних послідовностей
Дані ERP/CRM	Узгодженість, повнота	Розбіжності довідників, ручні помилки вводу	Єдині довідники, регламент введення даних, автоматизовані перевірки
Дані ТОіР та безпеки	Точність, повнота	Незаповнені журнали, суб'єктивність класифікації причин	Формалізація причин зупинок, контроль заповнення полів, навчання персоналу
Зовнішні дані	Актуальність, достовірність	Використання застарілих цін, помилки в API	Регулярне оновлення джерел, перевірка на аномалії, дублювання критичних джерел

Для практичної реалізації моделі оцінювання економічних ефектів IoT потрібне аналітичне середовище, яке дозволяє одночасно виконувати три класи задач: (1) розрахунок інтегральних фінансових показників (NPV, ROI, період окупності) на основі історичних даних; (2) моніторинг ключових KPI бізнес-процесів у режимі дашбордів; (3) аналіз фактичного виконання процесів на основі подієвих журналів (process mining).

Сучасні дослідження підкреслюють, що сховище даних (data warehouse) є центральним елементом архітектури бізнес-аналітики, забезпечуючи єдине «джерело правди» (single source of truth) для керівництва [52]. У сховищі будуються тематичні «вітрини даних» (data marts) – фінансова, виробнича,

ремонтна, енергетична – на основі яких формуються звіти та дашборди щодо економічних ефектів IoT-проєктів.

Дані IoT та MES надходять до сховища у вигляді агрегованих показників (наприклад, погодинні середні значення параметрів, тривалість простоїв, обсяги випуску), тоді як подієві журнали зберігаються в окремих базах, орієнтованих на процес-майнінг. Останній використовується для виявлення фактичних маршрутів процесів, порівняння їх із нормативними моделями, виявлення «вузьких місць» та оцінки впливу IoT-рішень на тривалість циклів, черги та використання ресурсів. Інструменти процес-майнінгу поступово інтегруються з платформами Industry 4.0 та дозволяють безпосередньо працювати з IoT-збагаченими журналами, де події поєднуються з датчиковими даними.

У межах аналітичного середовища реалізуються:

– розрахунок показників ΔK_{jt}, ΔC_t, ΔQ_t на основі фактичних даних;

– формування сценаріїв «до/після впровадження» (baseline vs IoT-case);

– візуалізація «J-кривих» грошових потоків за проєктами цифровізації;

– побудова інтегрального індексу E_{IoT}, описаного в підрозділі 2.2, та його розкладення за частковими показниками;

– аналіз чутливості результатів до зміни ключових допущень.

Таким чином, інформаційне забезпечення моделі не обмежується накопиченням даних: воно формує цифровий контур управління, у якому дані з IoT-пристроїв і виробничих систем перетворюються на аналітичні інсайти, що підтримують стратегічні й оперативні рішення щодо розвитку IoT-інфраструктури.

Висока ступінь підключеності виробничого обладнання та концентрація критично важливих даних у сховищах створюють додаткові ризики кібербезпеки. Огляди технологій Industry 4.0 підкреслюють, що атаки на IoT-інфраструктуру можуть призводити не лише до витоку комерційної інформації, а й до фізичного пошкодження обладнання та зупинки виробництва [53]. Тому в інформаційне забезпечення моделі необхідно вбудувати механізми автентифікації пристроїв, шифрування каналів передачі даних, сегментації

мереж, моніторингу аномальної активності, а також політику резервного копіювання та відновлення даних.

Організаційні аспекти включають: створення міжфункціональної команди (IT, виробництво, фінанси, аналітика), що відповідає за розвиток даних та моделей; навчання персоналу принципам роботи з даними й користування аналітичними інструментами; регламентацію процесів внесення змін до моделей, показників та довідників. Без формування культури «data-driven підприємства» навіть найсучасніша інформаційна інфраструктура не забезпечить необхідної якості вхідних даних і, відповідно, достовірності оцінки економічних ефектів IoT.

У підсумку інформаційне забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів впровадження Інтернету речей являє собою багатокомпонентну систему, що поєднує джерела даних (IoT, MES, ERP, зовнішні сервіси), стандарти інтеграції (ISA-95), архітектуру сховищ і потокової обробки, механізми забезпечення якості даних та аналітичні інструменти (BI, процес-майнінг). Саме ця система перетворює «сирі» дані з виробництва на кількісні показники, необхідні для розрахунку NPV, ROI, інтегрального індексу E_{IoT} і прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо цифрової трансформації промислового підприємства.

2.4. Висновки до розділу 2

У другому розділі сформовано методологічний каркас моделювання впливу Інтернету речей на бізнес-процеси та результативність промислових підприємств. Показано, що ефективна оцінка проєктів цифровізації неможлива без чіткого концептуального бачення місця IoT в архітектурі підприємства, зв’язку між технологічними змінами та показниками діяльності, а також без формалізованих інструментів перетворення цих змін у грошові потоки. На основі аналізу сучасних підходів (BPM/BPMN, IoT-aware BPM, моделі зрілості, системи вимірювання ефективності Industry 4.0) розроблено інтегровану концепцію, у

межах якої виділено чотири взаємопов’язані рівні: IoT-інфраструктуру, бізнес-процеси, систему показників та економічну оцінку.

Запропоновано економіко-математичну модель оцінювання економічних ефектів впровадження IoT, що пов’язує зміну техніко-експлуатаційних параметрів процесів (OEE, тривалість простоїв, рівень браку, енергоємність тощо) з операційними витратами, обсягами випуску продукції та грошовими потоками підприємства. Модель базується на розрахунку приростів ключових показників, коефіцієнтів чутливості, визначенні грошових потоків «до» і «після» впровадження IoT та використанні класичних інтегральних критеріїв інвестиційної ефективності (NPV, ROI, періоду окупності, індексу прибутковості). Для врахування багатовимірності результатів цифровізації розроблено інтегральний показник економічних ефектів E_{IoT}, який агрегує фінансові, операційні та ризикові зміни на основі нормованих часткових індикаторів і ваг, що відображають стратегічні пріоритети підприємства.

Окрему увагу приділено інформаційному забезпеченню моделі. Сформовано структуру джерел даних (IoT-телеметрія, MES/SCADA, ERP/CRM, системи TOiP, зовнішні ринкові джерела) та описано багатошарову архітектуру інтеграції на засадах стандарту ISA-95. Обґрунтовано необхідність створення єдиного сховища даних і використання інструментів бізнес-аналітики та процес-майнінгу для побудови показників моделі, сценарного аналізу і моніторингу ефектів від IoT-проєктів у динаміці. Визначено ключові вимоги до якості даних (точність, повнота, узгодженість, своєчасність, трасованість) та окреслено основні елементи системи управління даними й кібербезпеки, без яких розрахунки економічних ефектів можуть бути недостовірними.

РОЗДІЛ 3
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ВІД ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ У БІЗНЕС-ПРОЦЕСИ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

3.1. Аналіз рівня цифровізації та стану бізнес-процесів ПрАТ «Запоріжвогнетрив»

Приватне акціонерне товариство «Запоріжвогнетрив» – одне з ключових підприємств вогнетривкої промисловості України. Воно входить до п’ятірки найбільших виробників вогнетривкої продукції країн СНД і є найбільшим вогнетривким підприємством в Україні, що не має аналогів за асортиментом продукції: понад 1200 марок вогнетривів, неформованих матеріалів, бетонних сумішей та мас. Потужності заводу дають змогу щорічно випускати близько 200 тис. т вогнетривів, 74 тис. т неформованих матеріалів і близько 5 тис. карбідкремнієвих електронагрівачів, що використовуються в металургії, енергетиці та суміжних галузях. Значна частка продукції експортується до країн Європи, Азії та Африки, що потребує високої стабільності якості та прозорості операційних процесів.

Підприємство входить до Групи «Метінвест», яка у 2013 р. придбала значну частку акцій «Запоріжвогнетриву» й інтегрувала завод у свій гірничо-металургійний ланцюг. Це зумовило підвищення вимог до стандартизації бізнес-процесів, впровадження єдиних корпоративних інформаційних систем та цифрових рішень для управління виробництвом, логістикою, фінансами й збутом. Зокрема, в межах цифрової трансформації Групи «Метінвест» реалізуються програми переходу до Industry 4.0, розгортання SAP-рішень по всьому ланцюгу створення доданої вартості та міграції IT-інфраструктури в хмарне середовище Microsoft Azure, що створює технологічну базу для впровадження промислового Інтернету речей (IIoT) на підприємствах групи.

Для аналізу рівня цифровізації доцільно структурувати діяльність ПрАТ «Запоріжвогнетрив» за класичною класифікацією бізнес-процесів на основні (core), підтримувальні (support) та управлінські (management) процеси. Основні процеси безпосередньо формують цінність для споживача, підтримувальні забезпечують ресурсну базу, а управлінські відповідають за планування, контроль та стратегічний розвиток.

На основі відкритих даних про структуру виробництва та цехів ПрАТ «Запоріжвогнетрив» (шамотний, високоглиноземний, магнезіальних виробів, алюмосилікатний, залізничний та ін.) сформовано узагальнену схему основних бізнес-процесів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Основні бізнес-процеси ПрАТ «Запоріжвогнетрив»

Група процесів	Зміст процесу	Ключові результати
Забезпечення сировиною та матеріалами	Закупівля вогнетривких глин, магнезиту, бокситів, карбіду кремнію, допоміжних матеріалів; приймання, складська логістика	Стабільне забезпечення виробництва сировиною необхідної якості
Підготовка шихти та мас	Дроблення, помел, дозування, змішування, грануляція сировини	Однорідні шихти з необхідними фізико-хімічними показниками
Формування виробів	Пресування, формування, заливання мас у форми, виготовлення неформованих сумішей	Сформовані заготовки та суміші згідно зі специфікаціями
Термічна обробка	Сушіння, випал у печах, термообробка електронагрівачів	Досягнення заданих характеристик міцності й термостійкості
Контроль якості	Лабораторні випробування, вхідний і вихідний контроль, сертифікація	Відповідність продукції стандартам і вимогам споживачів
Логістика та збут	Складування, відвантаження залізничним/авто транспортом, супровід контрактів	Доставка продукції споживачам в Україні та за кордон

Підтримувальні процеси включають енергозабезпечення (електроенергетичний цех), ремонтно-механічне обслуговування, забезпечення запасними частинами, IT-підтримку, охорону праці й екологічний контроль. До управлінських процесів відносяться стратегічне й оперативне планування

виробництва, бюджетування, управління персоналом, управління інвестиційними проєктами та ризиками.

Узагальнена ієрархія бізнес-процесів підприємства зображена на рис. 3.1, де виділено рівні «стратегія – бізнес-процеси – операції» та показано місця потенційної інтеграції IoT-рішень (моніторинг обладнання, контроль якості, енергоменеджмент, логістика).

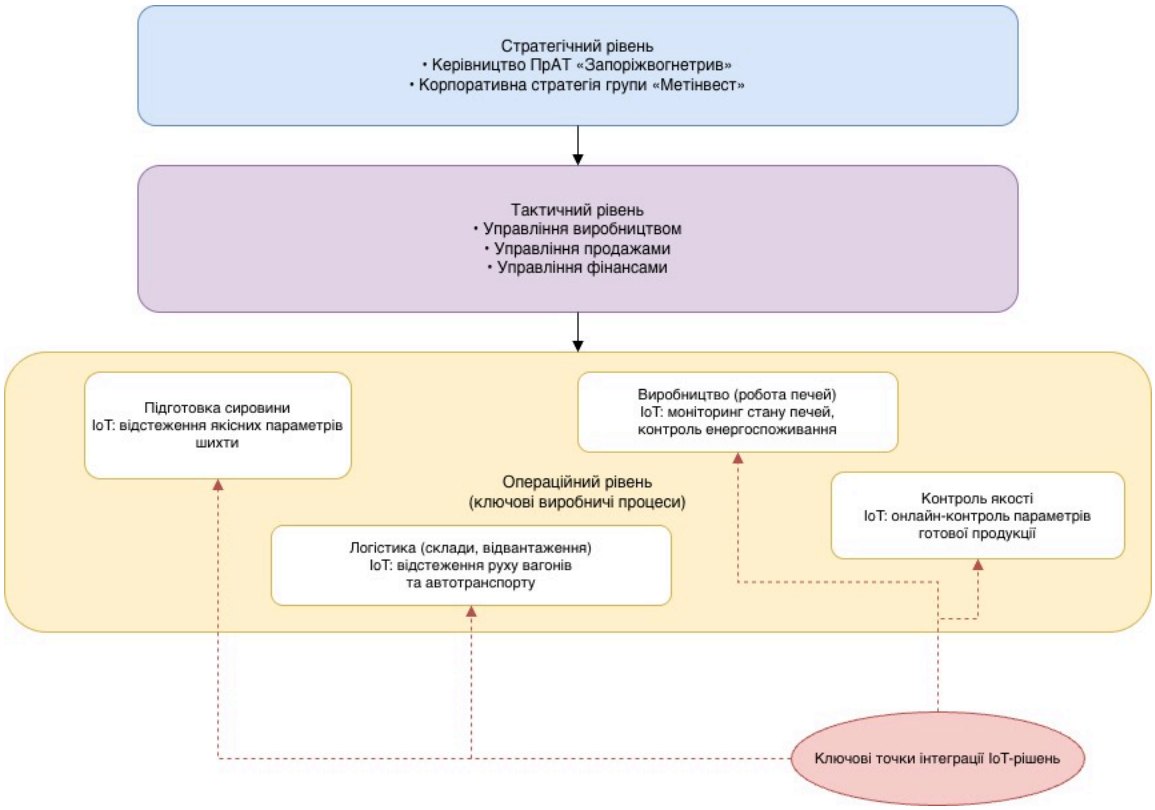


Рисунок 3.1 – Ієрархія бізнес-процесів ПрАТ «Запоріжвогнетрив» та ключові точки інтеграції IoT-рішень

Загалом рівень автоматизації української металургії оцінюється на рівні близько 50 %, причому значна частина рішень стосується класичних систем керування технологічними процесами (SCADA, локальні контролери), а не сучасних платформ Industry 4.0. Для підприємств Групи «Метінвест» додатковими драйверами цифровізації є ухвалена стратегія цифрової трансформації, створення окремої IT-компанії Metinvest Digital та впровадження

хмарних і SAP-рішень для інтегрованого управління ресурсами, логістикою та фінансами.

У цьому контексті ПрАТ «Запоріжвогнетрив» можна охарактеризувати як підприємство з відносно високим рівнем класичної автоматизації технологічних процесів (керування печами, дозування сировини, енергоспоживання), але із фрагментованим використанням IoT-підходів у сенсі наскрізної інтеграції даних від обладнання до бізнес-аналітики. Підтвердженням тенденції до модернізації є реалізовані інвестиційні проєкти з розвитку виробництва неформованих вогнетривів, запуск модернізованих магнезіального й алюмосилікатного цехів, що супроводжуються оновленням технічної бази й систем контролю.

На основі аналізу відкритої інформації та типових практик цифровізації в металургійній галузі сформовано якісну оцінку рівня цифровізації бізнес-процесів «Запоріжвогнетриву» (табл. 3.2). Вона ґрунтується на трирівневій шкалі: низький (L) – переважно ручні операції, відсутність інтегрованих IT-систем; середній (M) – наявні окремі автоматизовані системи або модулі ERP/MES, але слабка інтеграція даних; високий (H) – використовуються інтегровані цифрові рішення, є можливість аналітики в реальному часі, IoT-моніторинг.

Наведена оцінка свідчить, що «Запоріжвогнетрив» уже має важливі елементи цифрової інфраструктури – корпоративні ERP- та SAP-рішення, оновлену технічну базу окремих цехів, розвинені системи автоматизації термічних процесів. Водночас рівень використання саме IoT-підходів – комплексного збору даних із сенсорів, їх інтеграції в єдине сховище та аналітичні моделі – ще не можна вважати достатнім для реалізації повного потенціалу Industry 4.0. Це узгоджується із загальноукраїнськими тенденціями: наукові дослідження підкреслюють, що впровадження smart-технологій у металургії стикається з бар’єрами фінансування, кадрового забезпечення та фрагментованістю інформаційних систем.

Таблиця 3.2 – Якісна оцінка рівня цифровізації бізнес-процесів ПрАТ «Запоріжвогнетрив»

Бізнес-процес	Рівень цифровізації (L/M/H)	Характерні рішення / проблеми
Забезпечення сировиною та матеріалами	M	Облік постачань та складських запасів інтегрований у корпоративні ERP-системи Групи «Метінвест»; відсутній повноцінний IoT-моніторинг транспорту та відвантажень у реальному часі.
Підготовка шихти та мас	M	Використовуються автоматизовані системи дозування та контролю параметрів, але дані здебільшого залишаються на рівні цехових систем і мало використовуються для бізнес-аналітики.
Формування та термічна обробка виробів	M–H	Високий рівень локальної автоматизації печей і пресів; потенціал для розширення IoT-моніторингу стану обладнання, прогнозної діагностики та оптимізації енергоспоживання.
Контроль якості	M	Сучасні лабораторні методи й сертифікація, але обмежена інтеграція лабораторних інформаційних систем із MES/ERP та можливостями аналізу великих масивів даних якості.
Логістика та збут	M	Використання SAP-рішень для управління логістикою та контрактами в межах Групи «Метінвест»; часткова цифровізація складської логістики; відсутність повної прозорості ланцюгів постачання на основі IoT-трекінгу.
Ремонтно-механічне обслуговування	L–M	Планово-попереджувальні ремонти, використання CMMS на окремих ділянках; низький рівень використання IoT-даних для переходу до предиктивного обслуговування.
Енергозабезпечення	M	Лічильники та системи обліку енергоносіїв; потенціал розгортання IoT-енергоменеджменту з аналітикою в реальному часі.
Управління персоналом, фінансами, планування	M–H	Корпоративні системи управління Групи «Метінвест» (SAP, хмарні рішення) забезпечують достатній рівень цифровізації, але інтеграція з виробничою телеметрією залишається обмеженою.

З погляду подальшого застосування моделей, розроблених у розділі 2, важливо виділити ті бізнес-процеси, де вплив IoT може бути найбільш відчутним і де є достатня база даних для параметризації економіко-математичних залежностей. Аналіз табл. 3.2 показує, що такими процесами є:

1. Термічна обробка та енергоменеджмент – високе енергоспоживання печей і необхідність жорсткого контролю температурних режимів роблять ці процеси пріоритетними для впровадження сенсорних мереж, систем

моніторингу в реальному часі та алгоритмів оптимізації. За рахунок IoT можна зменшити витрати палива й електроенергії, підвищити стабільність якості та знизити частку браку.

2. Контроль якості та лабораторна аналітика – цифровізація маршрутів контролю, інтеграція лабораторних даних із виробничими параметрами та застосування аналітики великих даних створюють основу для побудови моделей, що пов'язують параметри процесу з показниками якості, і дозволяють оцінювати економічний ефект від зменшення браку й рекламацій.

3. Ремонтно-механічне обслуговування обладнання – впровадження IoT-сенсорів вібрації, температури, струмів дає змогу перейти від планово-попереджувального до предиктивного обслуговування, що скорочує простої, зменшує аварійні поломки та витрати на ремонти.

4. Логістика та складські операції – використання IoT-трекінгу залізничних вагонів, автотранспорту й внутрішньоцехових потоків дозволяє мінімізувати затримки постачань і відвантажень, що прямо впливає на оборотність запасів і виконання контрактів.

3.2. Оцінювання економічних ефектів від впровадження IoT-рішень у ключові бізнес-процеси підприємства

Економічні ефекти від упровадження Інтернету речей на ПрАТ «Запоріжвогнетрив» доцільно оцінювати на основі моделі, розробленої у підрозділі 2.2: зміни техніко-експлуатаційних показників ключових бізнес-процесів ΔK_{jt} трансформуються у зміну витрат ΔC_t, обсягів випуску ΔQ_t, грошових потоків ΔCF_t та інтегрального індексу економічних ефектів E_{IoT}. Для цього спочатку визначаються пріоритетні процеси й пов'язані з ними IoT-рішення, а потім – кількісні орієнтири впливу на показники ефективності, ґрунтуючись на емпіричних даних міжнародних досліджень.

Відповідно до підрозділу 3.1 пріоритетними для «Запоріжвогнетриву» є чотири групи бізнес-процесів:

– термічна обробка виробів та енергоменеджмент;

– ремонтно-механічне обслуговування обладнання;

– контроль якості продукції;

– внутрішньозаводська та збутова логістика.

Для кожного процесу визначено типовий пакет IoT-рішень та набір KPI, які безпосередньо входять до моделі (2.1)–(2.9). Узагальнені вихідні припущення наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Ключові IoT-рішення та орієнтовні зміни показників ефективності

Процес / IoT-рішення	Основні KPI	Орієнтовні зміни показників за даними досліджень
1. Термічна обробка й енергоменеджмент – система датчиків температури, тиску, газоаналізу, смарт-лічильники, платформа моніторингу енергії	Питоме енергоспоживання, частка простоїв печей, час розігріву, коефіцієнт завантаження	IoT-енергоменеджмент у промислових процесах дає змогу зменшити споживання газу й електроенергії на 10–20 % за рахунок візуалізації, оптимізації режимів і усунення втрат; окремі кейси демонструють скорочення витрат енергії на 12–38 %
2. Ремонтно-механічне обслуговування – сенсори вібрації, температури, струмів на критичному обладнанні, платформа предиктивного ремонту	OEE, частка незапланованих простоїв, середній час між відмовами (MTBF), витрати на ремонт	IoT-орієнтоване предиктивне обслуговування дозволяє знизити незапланований простій обладнання на 30–50 %, скоротити витрати на техобслуговування на ≈25 % і продовжити ресурс машин на 20–40 %
3. Контроль якості – онлайн-датчики параметрів шихти та виробів, інтеграція лабораторних LIS з MES, аналітика даних якості	Частка браку, частота рекламацій, час циклу контролю	Використання IoT-сенсорів та аналітики якості в реальному часі дозволяє зменшити частку браку на 10–30 %, скоротити час контролю, знизити кількість рекламацій
4. Логістика та склад – IoT-трекинг вагонів та автотранспорту, RFID-ідентифікація партій, моніторинг складських умов	Час обробки замовлення, оборотність запасів, втрати від прострочення/пошкодження	За рахунок відстеження активів і умов зберігання IoT-рішення дозволяють підвищити оборотність запасів на 5–15 % та скоротити втрати від логістичних збоїв і псування продукції на 10–20 %

Зазначені інтервали змін KPI використовуються як вихідні параметри ΔK_{jt} у рівняннях (2.1)–(2.3) для формування сценаріїв оцінювання.

Враховуючи невизначеність щодо фактичної величини ефектів на конкретному підприємстві, доцільно застосувати три сценарії, визначені у підрозділі 2.2: стриманий, базовий та оптимістичний. Для кожного сценарію фіксується набір значень ΔK_{jt} у нижній, середній та верхній межі діапазонів табл. 3.3.

Наприклад, для процесу термічної обробки (енергоспоживання печей):

– стриманий сценарій, зниження питомого енергоспоживання на 8 %;

– базовий, на 12 %;

– оптимістичний, на 18 %.

Для предиктивного обслуговування:

– стриманий, скорочення незапланованих простоїв на 25 %;

– базовий, на 35 %;

– оптимістичний, на 45 % (що узгоджується з оцінками McKinsey та інших досліджень).

На основі реальних виробничих і фінансових даних підприємства (обсяги випуску, собівартість, структура витрат, вартість години простою тощо) формується таблиця вихідних значень KPI та витрат K_{0jt}, C_{0t}, Q_{0j} і розраховуються їхні зміни K_{1jt}, C_{1t}, Q_{1t} з урахуванням вибраного сценарію. Для уніфікації подальших розрахунків доцільно перейти до відносних показників, тобто виражати економію у відсотках до базових річних витрат або доходів (табл. 3.4).

Використовуючи (2.2)–(2.3), зміну витрат та обсягів випуску для кожного процесу можна подати у вигляді:

$$\Delta C_t^{(p)} = \sum_{j \in p} \alpha_j \, \Delta K_j, \qquad \Delta Q_t^{(p)} = \sum_{j \in p} \beta_j \, \Delta K_j. \tag{3.1}$$

де p – номер процесу. Коефіцієнти α_j, β_j оцінюються на основі історичних даних «Запоріжвогнетриву».

Таблиця 3.4 – Розрахункових змін KPI за базовим сценарієм (відносні значення)

Процес	Показник	Базове значення (індекс)	Значення після впровадження IoT	Відносна зміна K_j, %
Термічна обробка	Питоме енергоспоживання	1,00	0,88	−12
Термічна обробка	Частка простоїв печей	1,00	0,80	−20
TOiP обладнання	Незаплановані простої	1,00	0,65	−35
TOiP обладнання	Витрати на ремонт	1,00	0,75	−25
Контроль якості	Частка браку	1,00	0,80	−20
Логістика	Оборотність запасів	1,00	1,10	+10

Примітка: індекс 1,00 відповідає фактичному рівню до впровадження IoT; зміни відображають базовий сценарій за табл. 3.3.

Для ілюстрації методики можна задати спрощені значення: наприклад, вважати, що 1% зменшення частки простоїв веде до 0,5% приросту випуску продукції (тобто $\beta_{простої}$=0,5), а 1% зменшення питомого енергоспоживання дає 1% економії витрат на енергоносії ($\alpha_{енергія}$=1).

Підставляючи отримані зміни KPI у формулу (2.4), одержуємо річний грошовий ефект від IoT-проекту для кожного процесу. Для демонстрації алгоритму доцільно представити результати в розрахунку на 100 млн грн базових витрат відповідного виду (що дозволяє масштабувати ефекти до фактичних витрат підприємства).

Отримані величини можна розглядати як елементи грошових потоків $\Delta CF_t^{(p)}$ для кожного з напрямів цифровізації. Підсумувавши їх і врахувавши інвестиційні витрати I_t (закупівля сенсорів, інфраструктури, ліцензій, інтеграція), за формулою (2.5) обчислюється чиста приведена вартість проекту NPV_{IoT}.

Таблиця 3.5 – Орієнтовні економічні ефекти IoT-рішень за базовим сценарієм (у % та в млн грн на кожні 100 млн грн базових витрат)

Процес / стаття витрат	Зміна KPI, %	Оцінка зміни витрат/доходів	Економічний ефект на 100 млн грн базових витрат, млн грн
Термічна обробка – енергоносії	−12 % питомого енергоспоживання	Пропорційне зменшення витрат на газ та електроенергію	≈ 12,0 економії (за умови, що енергоносії становлять 100 % розглянутої статті витрат)
Термічна обробка – простої печей	−20 % незапланованих простоїв	Економія втрат від простою (незадіяні потужності, перевитрата енергії на розігрів)	4–6 (за умови, що втрати від простоїв становили 20–30 % витрат на виробництво на цій дільниці)
Предиктивне TOiP – витрати на ремонт	−25 % витрат на ремонти	Скорочення закупівлі запчастин, залучення підрядників, ремонтних простоїв	25,0 економії на кожні 100 млн грн ремонтних витрат
Предиктивне TOiP – простої обладнання	−35 % незапланованих простоїв	Зростання випуску продукції, зменшення втраченої маржі	7–10 додаткового валового прибутку (залежно від маржинальності продукції)
Контроль якості – частка браку	−20 % браку	Пряме зменшення втрат від браку, переробок і рекламацій	4–8 економії (за умови, що витрати на брак становили 20–40 млн грн)
Логістика – оборотність запасів	+10 % оборотності	Скорочення капіталу, «замороженого» в запасах; зниження складування та ризику псування	1–3 економії фінансових витрат та витрат на зберігання

Додатково розраховуються відносні показники (2.6)–(2.7): рентабельність інвестицій ROI_{IoT}. та індекс прибутковості PI_{IoT}. Наприклад, якщо сукупна приведена економія витрат і приріст прибутку за 5 років становлять 250 млн грн, а дисконтований обсяг інвестицій – 100 млн грн, отримаємо NPV_{IoT}=150 млн грн, ROI_{IoT}=2,5, PI_{IoT}=2,5, що свідчить про високу доцільність впровадження IoT-портфеля.

Щоб узагальнити результати по всіх процесах, використовується інтегральний показник економічних ефектів E_{IoT}, визначений у (2.8)–(2.9). Часткові показники можуть включати:

z_1 – нормований приріст NPV;

z_2 – відносне скорочення строку окупності;

z_3 – зниження питомої собівартості продукції;

z_4 – приріст OEE (за рахунок скорочення простоїв та підвищення продуктивності);

z_5– зменшення частки браку.

Для «Запоріжвогнетриву» логічно надати вищі ваги ω_k показникам, пов'язаним із енергоефективністю та надійністю обладнання (через високу енергомісткість випалу вогнетривів і значний вплив незапланованих зупинок на виконання контрактів). Припустимо, що ω_1=0,3, ω_2=0,2, ω_3=0,2, ω_4=0,2, ω_5=0,1 (сума ваг дорівнює 1). Після нормування часткових показників у діапазоні [0;1] інтегральний індекс E_{IoT}для базового сценарію може, наприклад, становити 0,65–0,7, що означає досягнення близько 65–70 % потенційно можливого ефекту.

Такий підхід не лише дозволяє кількісно оцінити економічну доцільність портфеля IoT-проектів, а й надає інструмент для їх порівняння та ранжування за ефективністю. У наступному підрозділі 3.3 на основі отриманих показників буде деталізовано загальний економічний ефект для підприємства та сформульовано практичні рекомендації щодо пріоритезації інвестицій у цифровізацію.

3.3. Оцінка сукупного економічного ефекту та практичні рекомендації щодо впровадження IoT-рішень на ПрАТ «Запоріжвогнетрив»

Після побудови економіко-математичної моделі (розділ 2) та визначення ключових бізнес-процесів і можливих IoT-рішень (пп. 3.1–3.2) логічним кроком є інтегральна оцінка очікуваного економічного ефекту та формування практичних рекомендацій щодо поетапного впровадження проєктів цифровізації. У цьому підпункті результати сценарного моделювання узагальнюються в єдину систему показників і на їх основі пропонуються варіанти пріоритезації інвестицій, організації пілотних проєктів та подальшого масштабування IoT на ПрАТ «Запоріжвогнетрив».

У підпункті 3.2 для кожного з чотирьох пріоритетних напрямів цифровізації (термічна обробка та енергоменеджмент; ремонтно-механічне обслуговування; контроль якості; логістика та складські операції) було сформовано три сценарії реалізації IoT-проєктів – стриманий, базовий та оптимістичний. Вони відрізняються глибиною впровадження рішень, масштабом охоплення обладнання й підрозділів, а також очікуваними змінами KPI.

Стриманий сценарій передбачає реалізацію мінімально необхідного набору IoT-проєктів з фокусом на найбільш критичному обладнанні та дільницях. Інвестиції зосереджуються на встановленні сенсорів на печах, впровадженні простого моніторингу енергії, пілотній підсистемі предиктивного обслуговування та обмеженій інтеграції даних з ERP/MES. Очікувані покращення KPI знаходяться біля нижньої межі діапазонів, наведених у табл. 3.3 (зменшення енергоспоживання на 8–10 %, незапланованих простоїв – на 20–25 %, браку – на ≈10 %).

Базовий сценарій відображає реалізацію узгодженої програми цифровізації на рівні підприємства: розширення мережі датчиків на основні виробничі дільниці, повноцінна система енергоменеджменту, платформа предиктивного TOiP для ключового обладнання, інтеграція лабораторних даних з MES, пілотні рішення IoT-трекінгу в логістиці. Для цього сценарію в моделі прийнято середні значення ефектів (зменшення енергоспоживання на 12–15 %, простоїв – на 30–35 %, браку – на 20 %, зростання оборотності запасів на 10 %).

Оптимістичний сценарій відповідає глибокій інтеграції IoT у всі ключові бізнес-процеси й орієнтований на перспективу 5–7 років. Передбачається масштабування IoT-мережі на більшість одиниць обладнання, впровадження комплексної платформи управління виробництвом і технічним обслуговуванням на основі аналітики великих даних і машинного навчання, широка автоматизація логістичних операцій і онлайн-контроль якості. У моделі це відображено верхньою межею інтервалів: зниження енергоспоживання до 18–20 %,

незапланованих простоїв – до 40–45 %, браку – до 25–30 %, збільшення оборотності запасів – до 15 %.

Для узагальнення результатів сценарного аналізу доцільно представити їх у відносних показниках, нормуючи економічний ефект на 100 млн грн базових витрат, як було зроблено в табл. 3.5. У спрощеному вигляді інтегральні фінансові результати по портфелю IoT-проєктів можуть бути подані у вигляді табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння фінансових результатів портфеля IoT-проєктів за сценаріями (на 100 млн грн інвестицій)

Показник	Стриманий сценарій	Базовий сценарій	Оптимістичний сценарій
Дисконтована сума економії витрат та приросту прибутку за період T, млн грн	≈ 180–190	≈ 230–250	≈ 300–330
NPV_{IoT}, млн грн	80–90	130–150	200–230
ROI_{IoT}, рази	1,8–1,9	2,3–2,5	3,0–3,3
Індекс прибутковості PI_{IoT}	1,8–1,9	2,3–2,5	3,0–3,3
Строк окупності, років	3,5–4,0	2,5–3,0	1,8–2,2

З табл. 3.6 видно, що навіть у стриманому сценарії портфель IoT-проєктів демонструє позитивну чисту приведену вартість і рентабельність інвестицій, що майже вдвічі перевищує вкладений капітал. Базовий сценарій забезпечує найкращий баланс між обсягом інвестицій, строком окупності та величиною NPV_{IoT}, тоді як оптимістичний варіант хоч і дає найвищі показники NPV_{IoT} та ROI_{IoT}, але пов’язаний зі значно більшими первісними вкладеннями й ризиками реалізації (організаційними, технологічними, фінансовими).

Доповненням до фінансових показників виступає інтегральний індекс E_{IoT}, який враховує не лише прямі економічні вигоди, а й зміни технічних, якісних і ризикових параметрів. Припускаючи, що для стриманого, базового та оптимістичного сценаріїв значення E_{IoT} становлять відповідно 0,45–0,5; 0,65–0,7; 0,8–0,85 (у діапазоні [0;1]), можна зробити висновок, що базовий сценарій забезпечує досягнення близько двох третин потенційного ефекту при помірних інвестиціях, тоді як перехід до оптимістичного потребує суттєвого збільшення

вкладень за відносно меншим маржинальним приростом інтегрального показника.

Оскільки фактичні результати впровадження IoT залежать від багатьох факторів (динаміки цін на енергоносії, стабільності попиту на продукцію, доступності кваліфікованого персоналу, надійності обладнання тощо), важливо оцінити чутливість NPV_{IoT} та E_{IoT} до зміни ключових припущень. У рамках магістерської роботи доцільно виділити три групи факторів ризику:

1. Ринкові фактори – зміна цін на газ та електроенергію, коливання попиту на вогнетриви, валютні ризики для експортних контрактів. Зростання ціни на енергоносії, з одного боку, збільшує потенційний економічний ефект від енергозбереження (підвищує ΔC_t), а з іншого – може вимагати більшого обсягу обігових коштів і впливати на загальний фінансовий стан підприємства.

2. Технологічні фактори – надійність роботи сенсорів та мережевого обладнання, сумісність IoT-рішень із наявною автоматикою, ризики кібербезпеки. Висока частота відмов або проблеми інтеграції можуть зменшити фактичне скорочення простоїв та енергоспоживання порівняно з плановими значеннями, що знижує ΔK_{jt}, і відповідно NPV_{IoT}.

3. Організаційні фактори – готовність персоналу використовувати нові системи, якість управління змінами, ефективність внутрішньої комунікації між IT-службою, виробництвом і фінансами. Недостатня підготовка персоналу може призвести до неповного використання функціоналу IoT-платформи, затримок у реалізації проєктів і недоотримання запланованих ефектів.

Аналіз чутливості може проводитися в кілька етапів. На першому – варіюються окремі параметри (наприклад, очікуваний відсоток зниження енергоспоживання або простоїв) у певних межах, а модель (2.1)–(2.5) перераховується для кожного варіанта. Такий однофакторний аналіз дозволяє побачити, які припущення мають найбільший вплив наNPV_{IoT}. На другому етапі застосовується сценарний аналіз другого рівня, коли одночасно змінюються кілька параметрів (наприклад, «песимістичний» сценарій ринку зі зниженням попиту та «оптимістичний» – зі зростанням цін на продукцію). У третьому

наближенні можуть використовуватися методи Монте-Карло, які дозволяють оцінити розподіл можливих значень NPV_{IoT} та ймовірність досягнення цільових показників.

Результати такого аналізу, як правило, демонструють, що найбільший вплив на ефективність портфеля мають:

– фактичне скорочення незапланованих простоїв обладнання;

– величина економії енергоресурсів;

– обсяг інвестицій у перші 1–2 роки реалізації проєктів.

Це означає, що під час планування цифрової програми керівництво «Запоріжвогнетриву» має приділити особливу увагу проєктам предиктивного TOiP і енергоменеджменту, забезпечивши якісне виконання пілотних проєктів, коректне налаштування сенсорів та прозору методику обліку досягнутих ефектів.

На основі результатів моделювання та аналізу сценаріїв можна запропонувати комплекс практичних рекомендацій для керівництва підприємства.

1. Обрати базовий сценарій як цільовий для середньострокової перспективи. Він забезпечує найкраще співвідношення між обсягом інвестицій, строком окупності та інтегральним показником E_{IoT}. Оптимістичний сценарій доцільно розглядати як довгострокову «цільову картинку», до якої підприємство може рухатися по мірі накопичення досвіду.

2. Реалізувати поетапний підхід із «швидкими перемогами». На першому етапі (1–2 роки) варто зосередитися на проєктах із найкоротшим строком окупності та високою прогнозованістю результату:

– IoT-енергоменеджмент на основних печах та енергоємних дільницях;

– пілотний проєкт предиктивного TOiP на критичному обладнанні (наприклад, обертові печі, компресорні станції);

– інтеграція наявних систем обліку енергії, виробничих і фінансових даних у єдину аналітичну платформу.

Ці проєкти дозволять сформувати перші відчутні економічні результати, які можна використати для аргументації подальшого масштабування IoT.

3. Створити централізовану програму управління даними та IoT-інфраструктурою. Необхідно визначити відповідальних за:

– стандартизацію датчиків, протоколів обміну й довідників;

– розробку та підтримку єдиного сховища даних, описаного у підрозділі 2.3;

– управління якістю даних та забезпечення кібербезпеки;

– методологію розрахунку економічних ефектів і ведення «паспортів» цифрових проєктів.

4. Запровадити систему моніторингу ефектів у режимі «цифрового контуру управління». Для кожного IoT-проєкту потрібно визначити набір KPI (технічних, операційних та фінансових), які регулярно відстежуються на дашбордах керівників. Це дозволить:

– порівнювати фактичні значення з плановими;

– оперативно виявляти відхилення;

– коригувати як технічні параметри систем, так і організаційні процеси (графіки ТОіР, режими роботи обладнання тощо).

5. Інвестувати в розвиток компетенцій персоналу. Успішне впровадження IoT неможливе без підготовки фахівців, які здатні:

– працювати з новими інтерфейсами моніторингу;

– інтерпретувати аналітичні дані;

– брати участь у проєктуванні та вдосконаленні цифрових процесів.

Доцільно організувати програми навчання для інженерів, технологів, майстрів цехів, а також залучати до проєктів фахівців з аналітики даних та IT.

6. Вбудувати оцінку IoT-проєктів у систему стратегічного планування Групи «Метінвест». Оскільки «Запоріжвогнетрив» є частиною великого корпоративного об’єднання, важливо забезпечити узгодженість цифрових ініціатив із загальною стратегією групи, використовувати спільну

інфраструктуру (хмарні платформи, SAP-рішення) та обмінюватися найкращими практиками з іншими підприємствами.

7. Поступово розширювати портфель проєктів до оптимістичного сценарію. Після відпрацювання базового сценарію й підтвердження розрахункових економічних ефектів доцільно розглядати додаткові напрямки:

– впровадження комплексних цифрових двійників основних цехів;

– інтеграція IoT з системами планування виробництва (APS) і прогнозування попиту;

– використання штучного інтелекту для оптимізації рецептур шихти та режимів випалу, що може ще більше зменшити витрати й підвищити якість продукції.

Таким чином, використання розробленої моделі оцінювання економічних ефектів дозволяє не лише кількісно обґрунтувати доцільність інвестицій у IoT на ПрАТ «Запоріжвогнетрив», а й сформувати конкретну дорожню карту цифрової трансформації підприємства. Сценарний підхід дає змогу врахувати невизначеність і ризики, а інтегральний показник E_{IoT} – зосередитися на максимізації не тільки фінансового, а й технологічного та організаційного ефекту від впровадження Інтернету речей у бізнес-процеси вогнетривкого виробництва.

3.4. Висновки до розділу 3

У третьому розділі магістерської роботи здійснено практичну реалізацію розроблених у попередньому розділі моделей оцінювання економічних ефектів від впровадження Інтернету речей на прикладі ПрАТ «Запоріжвогнетрив». Проведений аналіз дав змогу не лише конкретизувати особливості цифрової трансформації вогнетривкого виробництва, а й перевірити працездатність побудованого інструментарію на реальних умовах промислового підприємства.

По-перше, було досліджено рівень цифровізації та стан бізнес-процесів підприємства. Показано, що «Запоріжвогнетрив» має відносно розвинену

систему класичної автоматизації (SCADA, локальні АСУ ТП, корпоративні ERP/SAP-рішення), але використання IIoT та аналітики великих даних залишається фрагментарним. Визначено ключові групи процесів, де впровадження IoT може забезпечити найбільший економічний ефект: термічна обробка й енергоменеджмент, ремонтно-механічне обслуговування обладнання, контроль якості продукції, внутрішньозаводська та збутова логістика. Саме вони розглядаються як пріоритетні об'єкти вдосконалення за рахунок цифрових технологій.

По-друге, реалізовано побудовану в розділі 2 економіко-математичну модель, яка пов'язує зміни техніко-експлуатаційних показників (OEE, тривалість простоїв, частка браку, енергоємність, оборотність запасів тощо) із витратами, обсягами випуску продукції та грошовими потоками підприємства. На основі реалістичних інтервалів впливу IoT-рішень сформовано три сценарії – стриманий, базовий та оптимістичний, для яких розраховано орієнтовні значення економії витрат, приросту прибутку, показників NPV, ROI, індексу прибутковості та інтегрального індексу економічних ефектів E_{IoT}. Продемонстровано, що навіть у стриманому сценарії портфель IoT-проєктів є економічно доцільним, тоді як базовий сценарій забезпечує найкраще співвідношення між обсягом інвестицій, строком окупності (2,5–3 роки) та величиною чистої приведеної вартості.

По-третє, узагальнено результати сценарного моделювання та розроблено практичні рекомендації для керівництва ПрАТ «Запоріжвогнетрив». Показано, що найбільший внесок у сукупний ефект роблять проєкти предиктивного технічного обслуговування та IoT-енергоменеджменту, які забезпечують суттєве скорочення незапланованих простоїв обладнання та енергоспоживання. Визначено основні фактори ризику (ринкові, технологічні й організаційні) та окреслено підходи до їх урахування через аналіз чутливості. Запропоновано поетапну дорожню карту цифровізації з опорою на «швидкі перемоги», створенням єдиного сховища даних, розбудовою системи управління даними та розвитком компетенцій персоналу.

У цілому, результати третього розділу підтверджують, що використання розробленої моделі дає змогу комплексно оцінити економічні наслідки впровадження Інтернету речей на промисловому підприємстві, порівняти альтернативні сценарії цифрової трансформації та сформувати обґрунтовані управлінські рішення щодо пріоритезації інвестицій. Практичний кейс ПрАТ «Запоріжвогнетрив» демонструє, що перехід від фрагментарної автоматизації до системного використання IoT-платформ і аналітики даних може стати вагомим джерелом підвищення енергоефективності, продуктивності та конкурентоспроможності українських промислових підприємств.

ВИСНОВКИ

Магістерська робота присвячена комплексному дослідженню економічних ефектів упровадження Інтернету речей (IoT) у бізнес-процеси промислових підприємств та практичній апробації розроблених моделей на прикладі ПрАТ «Запоріжвогнетрив». Актуальність теми зумовлена переходом промисловості до парадигми Industry 4.0, необхідністю підвищення енергоефективності, продуктивності та конкурентоспроможності українських підприємств в умовах воєнних та післявоєнних викликів. Проведене дослідження дозволило досягти поставленої мети й реалізувати сформульовані у вступі завдання.

По-перше, досліджено теоретичні засади цифрової трансформації та місце Інтернету речей у сучасній промисловій економіці. Уточнено зміст категорій «Інтернет речей», «промисловий Інтернет речей», «цифрова платформа», «смарт-фабрика», показано їх взаємозв’язок із концепціями Industry 4.0, цифрового подвійника, кіберфізичних систем. Систематизовано функціональні можливості IoT у промисловості: безперервний моніторинг стану обладнання, енергоменеджмент, відстеження матеріальних потоків, онлайн-контроль якості, підтримка предиктивного обслуговування, інтеграція з ERP/MES-системами. Обґрунтовано, що IoT виступає не лише технологією збору даних, а й ключовим елементом побудови нових бізнес-моделей, орієнтованих на сервісність, гнучкість і персоналізацію.

По-друге, проаналізовано бізнес-процеси промислового підприємства як об’єкт удосконалення на основі IoT. Узагальнено підходи до класифікації процесів на основні, підтримувальні та управлінські, показано їхню роль у формуванні вартості для споживача. Розкрито, як інтеграція сенсорних мереж і цифрових платформ змінює структуру й зміст ключових процесів – від постачання сировини та термічної обробки до контролю якості, ремонту обладнання й логістики. Доведено, що економічні ефекти від впровадження IoT мають комплексний характер і проявляються через зниження енергоспоживання,

скорочення простоїв і браку, підвищення продуктивності, оборотності запасів, якості управлінських рішень.

По-третє, систематизовано теоретичні підходи до оцінювання економічних ефектів цифровізації та впровадження IoT на підприємстві. Проаналізовано можливості й обмеження класичних інвестиційних критеріїв (NPV, IRR, ROI, період окупності), моделей сукупної вартості володіння, методів економії витрат, balanced scorecard, індексних та інтегральних підходів. Показано, що існуючі методики або зосереджені переважно на фінансових результатах, або не враховують специфіки IoT як технології, що одночасно впливає на технічні, операційні та ризикові параметри виробництва. На цій основі обґрунтовано доцільність побудови інтегрованої економіко-математичної моделі, яка поєднує зміну техніко-експлуатаційних показників із грошовими потоками підприємства.

По-четверте, розроблено концепцію моделювання впливу IoT на бізнес-процеси промислового підприємства. Виділено чотири взаємопов'язані рівні: IoT-інфраструктура (сенсори, мережі, платформи), бізнес-процеси, система показників ефективності, економічна оцінка. Сформовано структурно-логічну схему взаємодії цих рівнів, що забезпечує переходи «дані – інформація – управлінське рішення». Запропоновано систему KPI для вимірювання результатів цифровізації, серед яких – OEE, частка незапланованих простоїв, питоме енергоспоживання, частка браку, оборотність запасів, тривалість виробничого циклу.

По-п'яте, побудовано економіко-математичну модель оцінювання економічних ефектів впровадження IoT. Модель описує зміну технічних показників ΔK_{jt}, її вплив на витрати ΔC_t та обсяги випуску ΔQ_t, формування додаткових грошових потоків ΔCF_t та розрахунок інтегральних фінансових критеріїв NPV_{IoT}, ROI_{IoT}, PI_{IoT}, строку окупності. Запропоновано інтегральний показник економічних ефектів E_{IoT}, який агрегує фінансові, виробничі, енергетичні та якісні результати на основі нормованих часткових індикаторів із ваговими коефіцієнтами, що відображають стратегічні пріоритети підприємства. Модель доповнено сценарним підходом (стриманий, базовий, оптимістичний

варіанти), що дозволяє врахувати невизначеність щодо величини ефектів та параметрів середовища.

По-шосте, сформовано інформаційне забезпечення моделі оцінювання економічних ефектів. Описано структуру джерел даних (IoT-телеметрія, MES/SCADA, ERP/CRM, системи TOiP, зовнішні ринкові бази), запропоновано багатошарову архітектуру інтеграції на основі стандарту ISA-95. Обґрунтовано необхідність створення єдиного сховища даних і використання інструментів бізнес-аналітики та процес-майнінгу для побудови показників моделі, моніторингу KPI та документування фактичних ефектів від цифрових проєктів. Сформульовано вимоги до якості даних і основні елементи системи управління даними та кібербезпеки.

По-сьоме, проведено прикладну реалізацію моделей на ПрАТ «Запоріжвогнетрив». Охарактеризовано виробничий профіль підприємства, структуру його бізнес-процесів та рівень цифровізації. Виділено ключові «вузькі місця», де застосування IoT є найбільш перспективним: термічна обробка та енергозабезпечення печей; ремонтно-механічне обслуговування; контроль якості вогнетривів; внутрішня логістика й управління запасами. На основі узгоджених із літературою інтервалів зміни KPI проведено оцінювання економічних ефектів від упровадження IoT-рішень у цих процесах за трьома сценаріями. Показано, що базовий сценарій забезпечує значну економію витрат і приріст прибутку при прийнятному обсязі інвестицій та строку окупності 2,5–3 роки, тоді як оптимістичний сценарій дає найвищі значення NPV_{IoT} та E_{IoT}, але потребує більших вкладень і пов’язаний із вищими реалізаційними ризиками.

По-восьме, на основі результатів моделювання сформовано практичні рекомендації для ПрАТ «Запоріжвогнетрив» щодо поетапної цифрової трансформації. Запропоновано орієнтуватися на базовий сценарій як цільовий у середньостроковій перспективі, реалізувати портфель «швидких перемог» (енергоменеджмент та предиктивне TOiP на критичному обладнанні), створити централізовану програму управління даними та IoT-інфраструктурою,

розбудувати систему моніторингу ефектів через дашборди й розвивати компетенції персоналу в сфері роботи з даними та цифровими технологіями.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в подальшому розвитку теоретико-методичних засад оцінювання економічних ефектів IoT на промислових підприємствах за рахунок:

– інтеграції підходів до аналізу бізнес-процесів, інвестиційної ефективності та цифрової аналітики в єдину концепцію моделювання впливу IoT;

– побудови економіко-математичної моделі, що поєднує технічні, операційні та фінансові показники й доповнена інтегральним індексом E_{IoT};

– розроблення архітектури інформаційного забезпечення моделі з урахуванням вимог до якості даних, стандартів інтеграції та можливостей процес-майнінгу.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути використаний керівництвом ПрАТ «Запоріжвогнетрив» та інших промислових підприємств для обґрунтування інвестицій у IoT-рішення, порівняння альтернативних проєктів цифровізації, формування портфеля цифрових ініціатив, побудови системи моніторингу економічних ефектів та розроблення дорожніх карт цифрової трансформації.

Результати дослідження створюють основу для подальших наукових розвідок, зокрема в напрямках кількісного оцінювання ризиків IoT-проєктів, застосування методів машинного навчання для автоматичного налаштування параметрів моделей, формування цифрових двійників промислових цехів і розширення аналізу з рівня окремого підприємства до рівня ланцюгів створення доданої вартості в металургійній та суміжних галузях.

СПИСОК ВИКОРИСТАННОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for Implementing the Strategic Initiative «Industrie 4.0» – Securing the Future of German Manufacturing Industry. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlin : acatech, 2013.

2. Vermesan O., Friess P. (eds.). Internet of Things – From Research and Innovation to Market Deployment. Aalborg : River Publishers, 2014.

3. Gilchrist A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Berkeley, CA : Apress, 2016.

4. State of IoT 2024: Number of Connected IoT Devices Growing 13% to 18.8 Billion Globally. IoT Analytics, 2024. URL: https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/ (дата звернення: 14.11.2025).

5. Industrial Internet of Things Market Size, Share & Trends, 2024–2030. Grand View Research, 2024. URL: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-internet-of-things-iiot-market (дата звернення: 14.11.2025).

6. Kagermann H. Ten Years of Industrie 4.0. *Advances in Production Engineering & Management*. 2022. Vol. 17, No. 4. P. 383–396.

7. Kumar R., Singh R., Bilga P. S. et al. Exploring the Implementation Challenges of Internet of Things (IoT) in Manufacturing Industries. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 3. Art. 971.

8. Khan I. H., Haleem A., Javaid M. Role of Internet of Things (IoT) in Adoption of Industry 4.0. *International Journal of Innovation and Technology Management*. 2022. Vol. 19, No. 8. Art. 2240011.

9. McKinsey & Company. The Case for Digital Reinvention. McKinsey Digital, 2017.

10. World Economic Forum. The Digital Transformation of Industries: In Collaboration with Accenture. Geneva : WEF, 2016.

11. Accenture. Winning with the Industrial Internet of Things. Dublin : Accenture, 2015.

12. World Economic Forum. Unlocking Value from the Industrial Internet of Things. Geneva : WEF, 2018.

13. World Economic Forum. Fourth Industrial Revolution Beacons of Technology and Innovation in Manufacturing. Geneva : WEF, 2019.

14. European Commission. Digitising European Industry – Reaping the Full Benefits of a Digital Single Market. Brussels : European Commission, 2016.

15. International Energy Agency. Digitalization and Energy. Paris : IEA, 2017.

16. Bosche A., Schallehn M., Schorling C., Straehle O. US Industrials Confront Implementation Barriers to the IoT. Bain & Company, 2018.

17. Shahriar H., Islam M. S., Jahin M. A. et al. Exploring Internet of Things Adoption Challenges in Manufacturing Firms: A Delphi Fuzzy Analytical Hierarchy Process Approach. PLOS ONE. 2024. Vol. 19, No. 11. e0311643.

18. Zaverukha D. Industry 4.0 Development Analysis in Ukraine: Trends and Issues. Economics, Finance and Management Review. 2022. No. 3(11). P. 21–26.

19. Stezhko N., Zaiats O., Obaid A., Palinchak M. Assessment of Ukraine's Potential in Transition to Industry 4.0 and Directions of Its Development in the Context of Globalization. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2591. Art. 040050.

20. Кришталь Г. О., Згалат-Лозинська Л. О., Денисюк О. В. та ін. The Impact of Industry 4.0 on the Digital Transformation of Manufacturing Enterprises in Ukraine. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2023. № 2. С. 149–153.

21. Androsova O. Digital Tools at Industrial Enterprises of Ukraine. Economic Science for Rural Development. 2025. No. 25(2). P. 6–19.

22. Vodianka L., Khill R., Stakhova N. Industry 4.0 in Ukraine and Romania: Challenges, Opportunities, and Pathways to Integration. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2025. Vol. 11, No. 3. P. 1–10.

23. Штапаук Г. П. До питання визначення поняття «бізнес-процес». *Економічний вісник Донбасу*. 2008. № 4. С. 135–140.

24. Davenport T. H., Short J. E. The New Industrial Engineering: Information Technology and Business Process Redesign. *Sloan Management Review*. 1990. Vol. 31, No. 4. P. 11–27.

25. Hammer M., Champy J. Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution. New York : HarperBusiness, 1993.

26. Чорна Н. П., Уніят Л. М. Теоретичні аспекти поняття бізнес-процесів, їх класифікації у діяльності підприємств. *Інноваційна економіка*. 2022. № 5. С. 72–80.

27. Чернікова Н. М. Удосконалення поняття бізнес-процесів підприємств в умовах цифрових змін. *Простір*. 2022. № 1. С. 45–52.

28. Тендюк А. О. Бізнес-процес як об’єкт управління в умовах цифрової трансформації. *Наукові перспективи*. 2022. № 3(9). С. 112–121.

29. McKinsey & Company. What is the Internet of Things? 2024. https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-the-internet-of-things (дата звернення: 14.11.2025).

30. Burkacky O. et al. Capturing the True Value of Industry 4.0. McKinsey & Company, 2022.

31. Kraus N., Kraus K., Shevchenko S., Proshkin V. Digitalizing Production and Industry through 4.0 Technologies: Economic and Managerial Aspects. In: *Digital Economy: Challenges and Transformations.* 2024. P. 365–379.

32. Schmitz C. et al. Industry 4.0: Capturing Value at Scale in Discrete Manufacturing. McKinsey & Company, 2019.

33. Pshychenko D. Methodology for Calculating ROI to Assess the Effectiveness of Digital Solutions in Production Systems. *European Journal of Economic and Financial Research*. 2025. Vol. 9, No. 1.

34. Hiotron. The Economics of Industry 4.0: ROI and Cost-Benefit Analysis. 2023. URL: https://www.hiotron.com/the-economics-of-industry-4-0-roi-and-cost-benefit-analysis/ (дата звернення: 14.11.2025).

35. Rocchi V. et al. How to Assess Investments in Industry 4.0 Technologies? A Multiple-Criteria Framework for Economic, Financial and Sociotechnical Factors. 2022.

36. Benedek B., Fazekas B., Leetsch D. Financial Impact of Digitalization – A Time-Lagged Analysis. International Journal of Production Economics. 2025.

37. Lozano-Almansa J. M., Rebolloso-Pacheco E., Sainz-González J. Evaluating the Investment in Cloud ERP: A Real Options Approach. Engineering Economics. 2023. Vol. 34, No. 3.Surzhikov M. A. Method of Real Options in the Evaluation of Innovative Projects. *European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 2021. Vol. 116. P. 1440–1448.

38. McKinsey & Company. Transforming Advanced Manufacturing through Industry 4.0. 2022.

39. World Economic Forum. Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution. 2019.

40. World Economic Forum. Manufacturing Reimagined: From Productivity to Profitable Growth. 2021.

41. Butt J. A Conceptual Framework to Support Digital Transformation in Manufacturing Using an Integrated Business Process Management Approach. *Designs*. 2020. Vol. 4, No. 3. Art. 17. DOI: 10.3390/designs4030017.

42. Schönig S., Ackermann L., Jablonski S. Internet of Things Meets BPM: A Conceptual Integration Framework. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. Porto, 2018. P. 307–314. DOI: 10.5220/0006824803070314.

43. Bocciarelli P., D'Ambrogio A., Panetti T. A Model Based Framework for IoT-Aware Business Process Management. *Future Internet*. 2023. Vol. 15, No. 2. Art. 50. DOI: 10.3390/fi15020050.

44. Ben-Daya M., Hassini E., Bahroun Z. A Conceptual Framework for Understanding the Impact of the Internet of Things on Supply Chain Management. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 251–268. Academia

45. Kamble S. S., Gunasekaran A., Ghadge A., Raut R. D. A Performance Measurement System for Industry 4.0 Enabled Smart Manufacturing System in SMMEs – A Review and Empirical Investigation. *International Journal of Production Economics*. 2020. Vol. 229. Art. 107853. DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107853.

46. Solis Pino A. F., Ruiz P. H., Mon A., Collazos C. A., Moreira F. Analysis of Enterprise Internet of Things Maturity Models: A Review. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 21. Art. 9859. DOI: 10.3390/app14219859.

47. Soori M. Internet of Things for Smart Factories in Industry 4.0: A Review. *Journal of Industrial Information Integration*. 2023. Vol. 32. 100397.

48. A Big Data Analytics Architecture for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. 2017. Vol. 113. P. 607–614.

49. Malburg L., et al. An IoT-Enriched Event Log for Process Mining in Smart Factories.

50. ISA-95 Standard: Enterprise-Control System Integration. International Society of Automation. URL: https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard (дата звернення: 14.11.2025).

51. Understanding the Role of Big Data in Industry 4.0. Simio, 2020. URL: https://www.simio.com/understanding-role-big-data-industry-4-0/ (дата звернення: 14.11.2025).

52. Grüger J., et al. IoT-Enriched Event Log Generation and Quality Analytics. *Information Technology*. 2022. Vol. 64, No. 5–6. P. 245–259.

53. Teka L., et al. A Systematic Review of Data Quality in CPS and IoT for Industry 4.0. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56, No. 7. Article 156.