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 Розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств

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) Н. А. Фісенко

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)
Фісенка Назарія Андрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств
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 показники діяльності ПрАТ «ІнноваПром»
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Теоретичні основи цифрової трансформації підприємств. 2. Розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації. 3. Практична реалізація агент-орієнтованої моделі на прикладі ПрАТ «ІнноваПром».
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Концептуальні підходи до цифрової трансформації підприємств. Драйвери та бар'єри цифрової трансформації підприємств. Етапи розвитку агент-орієнтованого підходу в економічних дослідженнях. Сфери застосування агент-орієнтованого моделювання у цифровій економіці. Порівняння зарубіжного та українського досвіду цифрової трансформації. Агентна структура цифрової екосистеми підприємства. Система зворотних зв'язків у цифровій екосистемі підприємства.

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 _____ Н. А. Фісенко
(підпис) (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____
(підпис) (ініціали та прізвище

АНОТАЦІЯ

Фісенко Н. А. Розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств

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 розробці агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств.

В роботі досліджено теоретичні основи цифрової трансформації підприємств та підходи до її моделювання; проаналізовано методологічні засади агент-орієнтованого підходу та його застосування у соціально-економічних системах; побудовано агент-орієнтовану модель цифрової екосистеми підприємства; реалізовано модель на прикладі ПрАТ «ІнноваПром» та досліджено сценарії цифрової трансформації; оцінено економічний ефект від застосування моделі та сформовано практичні рекомендації для впровадження.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств, яка дозволяє врахувати поведінку та взаємодію економічних агентів у цифровому середовищі. Удосконалено підхід до моделювання цифрової екосистеми підприємства шляхом інтеграції агентного підходу з методами сценарного аналізу. Дістали подальшого розвитку положення щодо оцінки економічного ефекту цифрової трансформації з використанням імітаційних моделей.

Ключові слова: ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ, АГЕНТ-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ЦИФРОВА ЗРІЛІСТЬ ПІДПРИЄМСТВА, ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ, ІНДЕКС ЦИФРОВИХ КОМПЕТЕНЦІЙ, ІНДЕКС ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ, СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ

SUMMARY

Fisenko N. A. Development of an agent-oriented model of digital transformation of 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. Potebnia ZNU, Department of Information Economics, Entrepreneurship and Finance, 2025.

Master's thesis is devoted to the development of an agent-oriented model of digital transformation of enterprises.

The work explores the theoretical foundations of digital transformation of enterprises and approaches to its modeling; analyzes the methodological principles of the agent-oriented approach and its application in socio-economic systems; builds an agent-oriented model of the digital ecosystem of the enterprise; implements the model on the example of PrJSC "InnovaProm" and explores digital transformation scenarios; assesses the economic effect of applying the model and formulates practical recommendations for implementation.

The scientific novelty of the results obtained lies in the development of an agent-oriented model of digital transformation of enterprises, which allows taking into account the behavior and interaction of economic agents in the digital environment. The approach to modeling the digital ecosystem of an enterprise has been improved by integrating the agent approach with scenario analysis methods. The provisions on assessing the economic effect of digital transformation using simulation models have been further developed.

Keywords: DIGITAL TRANSFORMATION, AGENT-ORIENTED MODELING, DIGITAL MATURITY OF AN ENTERPRISE, ECONOMIC EFFECT, DIGITAL COMPETENCE INDEX, PROCESS INTEGRATION INDEX, SCENARIO MODELING OF DEVELOPMENT

ЗМІСТ

ВСТУП…… 7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ …… 9
1.1. Сутність та концепції цифрової трансформації в сучасній економіці …….. 9
1.2. Теоретичні підходи до агент-орієнтованого моделювання соціально-економічних систем ……. 15
1.3. Зарубіжний і вітчизняний досвід застосування моделей цифрової трансформації ……..... 21
1.4. Висновки до розділу 1…….. 27
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА АГЕНТ-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ……..……... 29
2.1. Постановка задачі моделювання та визначення ключових факторів цифрової трансформації …… 29
2.2. Побудова агент-орієнтованої моделі цифрової екосистеми підприємства …… 31
2.3. Методологія дослідження сценаріїв цифрової трансформації підприємств …… 42
2.4. Висновки до розділу 2…….. 50
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АГЕНТ-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ НА ПРИКЛАДІ ПрАТ «ІННОВАПРОМ»…… 52
3.1. Аналіз стану та передумов цифрової трансформації ПрАТ «ІннноваПром»……. 52
3.2. Реалізація агент-орієнтованої моделі та дослідження сценаріїв розвитку підприємства …… 59
3.3. Оцінка економічного ефекту та рекомендації щодо впровадження результатів дослідження…….. 67
3.4. Висновки до розділу 3…….. 74
ВИСНОВКИ…… 76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….. 78

ВСТУП

Актуальність теми. Цифрова трансформація є ключовим фактором розвитку сучасних підприємств в умовах глобалізації та зростаючої конкуренції. Вона охоплює впровадження інформаційних технологій, автоматизацію бізнес-процесів, розвиток електронних комунікацій та застосування штучного інтелекту у сфері управління. Для України процес цифрової трансформації особливо актуальний, адже він дозволяє подолати технологічне відставання, інтегруватися у світовий економічний простір та забезпечити сталий розвиток національної економіки.

Попри значну увагу до цифровізації, наукове середовище зіштовхується з проблемою адекватного моделювання цих процесів. Традиційні методи економіко-математичного аналізу не завжди здатні відобразити складну взаємодію між різними агентами економічної системи: підприємствами, споживачами, державними інституціями. У цьому контексті перспективним інструментом виступає агент-орієнтоване моделювання, яке дозволяє описати поведінку та взаємодію окремих учасників цифрової екосистеми та дослідити наслідки їх колективної динаміки. Таким чином, розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств має не лише наукове, а й практичне значення для формування стратегій розвитку бізнесу в умовах цифрової економіки.

Метою магістерської роботи є розробка агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств.

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

– досліджено теоретичні основи цифрової трансформації підприємств та підходи до її моделювання;

– проаналізовано методологічні засади агент-орієнтованого підходу та його застосування у соціально-економічних системах;

– побудовано агент-орієнтовану модель цифрової екосистеми підприємства;

– реалізовано модель на прикладі ПрАТ «ІнноваПром» та досліджено сценарії цифрової трансформації;

– оцінено економічний ефект від застосування моделі та сформовано практичні рекомендації для впровадження.

Об’єкт дослідження – процес цифрової трансформації підприємств у сучасних економічних умовах.

Предмет дослідження – агент-орієнтована модель цифрової трансформації підприємства як інструмент аналізу та прогнозування.

Методи дослідження. У роботі використано системний підхід, методи економіко-математичного моделювання, агент-орієнтоване моделювання, імітаційне моделювання, методи сценарного аналізу, статистичний аналіз та порівняльні методи. Вибір цих методів зумовлений необхідністю комплексно відобразити процеси цифрової трансформації та оцінити їх економічні наслідки.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємств, яка дозволяє врахувати поведінку та взаємодію економічних агентів у цифровому середовищі. Удосконалено підхід до моделювання цифрової екосистеми підприємства шляхом інтеграції агентного підходу з методами сценарного аналізу. Дістали подальшого розвитку положення щодо оцінки економічного ефекту цифрової трансформації з використанням імітаційних моделей.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування розробленої моделі для обґрунтування управлінських рішень щодо цифровізації бізнес-процесів на підприємствах України. На прикладі ПрАТ «ІнноваПром» продемонстровано, як агент-орієнтована модель може використовуватися для оцінки ефективності сценаріїв цифрової трансформації, прогнозування економічних результатів та визначення оптимальної стратегії розвитку.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг становить 77 сторінок, включаючи 34 таблиці, 9 рисунків та понад 62 джерела літератури.

РОЗДІЛ 1
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІДПРИЄМСТВ

1.1. Сутність та концепції цифрової трансформації в сучасній економіці

У сучасних умовах розвитку економіки цифрова трансформація виступає однією з провідних тенденцій, яка визначає конкурентоспроможність підприємств і національних економік у цілому. Поняття «цифрова трансформація» (digital transformation) сформувалося у світовій науковій літературі на початку 2000-х років у зв'язку з активним впровадженням інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у бізнес-процеси та державне управління. Згідно з визначенням компанії Gartner, цифрова трансформація – це «використання цифрових технологій для створення нових або зміни існуючих бізнес-процесів, культури та досвіду клієнтів з метою задоволення вимог ринку, що змінюється» [1].

Наукова дискусія щодо змісту цього поняття свідчить про його багатовимірність. Так, за підходом В. В. Тарасової та І. В. Мельник, цифрова трансформація трактується як системний процес зміни бізнес-моделей підприємств на основі цифрових технологій, що включає автоматизацію, роботизацію, впровадження великих даних та штучного інтелекту [2]. Інші дослідники (наприклад, M. Reis та співавт.) підкреслюють, що цифрова трансформація – це не лише технологічне оновлення, а передусім організаційні зміни та розвиток нових компетенцій персоналу [3].

Цифрова трансформація охоплює всі рівні функціонування економічних систем: від глобальної економіки до окремого підприємства. На макрорівні вона сприяє формуванню цифрової економіки, що базується на використанні даних як ключового ресурсу. На мезорівні цифрові інструменти забезпечують інтеграцію виробничих ланцюгів, розвиток кластерів та регіональних екосистем. На

мікрорівні підприємства набувають нових можливостей у сфері оптимізації витрат, підвищення продуктивності та персоналізації взаємодії з клієнтами [4].

Узагальнене уявлення про співвідношення понять «інформатизація», «цифровізація» та «цифрова трансформація» наведено в таблиці 1.1, де показано еволюцію підходів до використання цифрових технологій у бізнесі.

Таблиця 1.1 – Еволюція понять у контексті розвитку цифрових технологій

Поняття	Основна характеристика	Приклади застосування
Інформатизація	Використання IT для автоматизації окремих функцій	Автоматизація бухгалтерського обліку, електронний документообіг
Цифровізація	Масове впровадження цифрових технологій у бізнес-процеси	CRM-системи, ERP, хмарні обчислення
Цифрова трансформація	Комплексна зміна бізнес-моделі на основі цифрових технологій	Платформи електронної комерції, цифрові екосистеми, Industry 4.0

Цифрова трансформація є якісно новим етапом розвитку підприємств, що відрізняється від традиційної автоматизації та цифровізації глибиною змін у стратегії, культурі та організаційних практиках. Вона спрямована не лише на підвищення ефективності, але й на створення нових цінностей для споживачів і суспільства в цілому.

Однією з найбільш поширених концепцій цифрової трансформації є Industry 4.0, яка передбачає інтеграцію кіберфізичних систем, Інтернету речей, великих даних і штучного інтелекту у виробничі та управлінські процеси. Вперше цей термін було запропоновано у Німеччині у 2011 році як стратегічний план модернізації промисловості [5]. Основою Industry 4.0 є створення «розумних фабрик» (smart factories), де виробничі процеси управляються в реальному часі на основі взаємодії обладнання, програмного забезпечення і людей. Цей підхід забезпечує високу гнучкість виробництва, персоналізацію продукції та оптимізацію ресурсів.

Другою ключовою концепцією є платформізація бізнесу, яка передбачає перехід підприємств від класичної лінійної бізнес-моделі до багатосторонніх цифрових платформ. За дослідженням McKinsey, цифрові платформи

забезпечують до 70 % приросту ринкової вартості компаній у сфері високих технологій [6]. Платформа виступає як середовище, де взаємодіють різні групи агентів – виробники, споживачі, партнери, постачальники, формуючи нові механізми створення доданої вартості. Прикладами успішної реалізації платформних бізнес-моделей є Amazon, Alibaba, Uber.

Ще одним важливим підходом виступає екосистемна модель цифрової трансформації, яка розглядає підприємство як частину більшої мережі взаємопов'язаних організацій, що створюють спільну цінність. Такий підхід дозволяє підприємствам ефективно інтегрувати цифрові інновації, формувати партнерські альянси, обмінюватися даними і ресурсами. Як зазначає J. Jacobides, успішність цифрових екосистем залежить від здатності компаній організовувати співпрацю в умовах відкритих інновацій та динамічного ринку [7].

Узагальнено співвідношення основних концепцій цифрової трансформації показано на рисунку 1.1, де виділено три ключові напрями: технологічний (Industry 4.0), бізнес-модельний (платформи) та екосистемний (цифрові екосистеми).

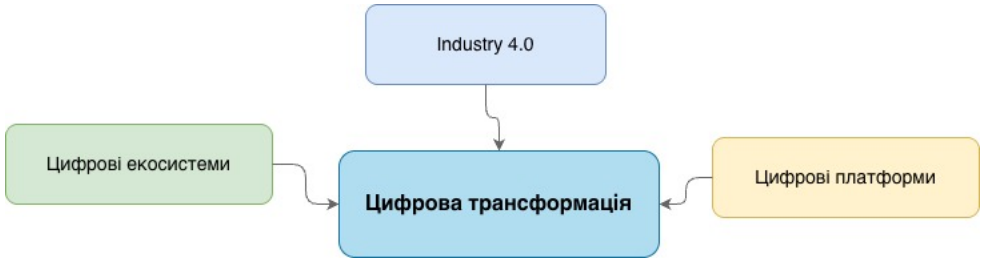


Рисунок 1.1 – Концептуальні підходи до цифрової трансформації підприємств

Сучасні концепції цифрової трансформації можна розглядати як взаємодоповнюючі. Industry 4.0 забезпечує технологічну основу, платформізація формує нові бізнес-моделі, а екосистемний підхід створює умови для довгострокового розвитку та інноваційної взаємодії між учасниками цифрової економіки.

Цифрова трансформація не є одномоментним процесом, а результатом поступової еволюції підходів до використання інформаційних технологій у бізнесі. Кожен етап характеризується власними технологічними досягненнями, організаційними змінами та стратегічними орієнтирами.

Перший етап – автоматизація бізнес-процесів (1980–1990-ті рр.). На цьому етапі підприємства почали активно використовувати комп'ютерні системи для автоматизації бухгалтерського обліку, управління запасами, виробничого планування. Основна мета полягала у зменшенні витрат часу та ресурсів на виконання рутинних операцій. Прикладами є впровадження перших ERP-систем, таких як SAP R/3 [8].

Другий етап – цифровізація (2000–2010-ті рр.). Відзначався масовим впровадженням інтернет-технологій, мобільних додатків, CRM-систем. Бізнес почав фокусуватися не лише на внутрішній ефективності, а й на створенні нових каналів взаємодії з клієнтами. У цей період стрімко розвиваються електронна комерція, онлайн-банкінг, хмарні обчислення [9].

Третій етап – цифрова трансформація (з 2010-х років). Характеризується комплексною перебудовою бізнес-моделей підприємств під впливом великих даних, штучного інтелекту, Інтернету речей, блокчейну. Відмінністю від попередніх етапів є не лише впровадження технологій, а й трансформація організаційної культури, систем управління та стратегій розвитку. Приклади: «розумні фабрики» Siemens, платформи електронної логістики Maersk, цифрові екосистеми Amazon [10].

Четвертий етап – формування цифрових екосистем (сучасний тренд). Підприємства перестають діяти ізольовано, інтегруючись у розгалужені мережі партнерів, постачальників, клієнтів та державних інституцій. У центрі цього підходу знаходиться даноцентричність, а головним ресурсом стають дані про поведінку агентів. Це дозволяє формувати інноваційні продукти та сервіси, які неможливо створити у межах одного підприємства [11].

Еволюція підходів до цифрової трансформації представлена у таблиці 1.2, де показано основні етапи, ключові технології та приклади галузей.

Таблиця 1.2 – Етапи еволюції цифрової трансформації підприємств

Етап	Характеристика	Ключові технології	Приклади галузей
Автоматизація (1980–1990-ті)	Оптимізація рутинних операцій	ERP, локальні мережі	Промисловість, фінанси
Цифровізація (2000–2010-ті)	Масове впровадження IT у бізнес-процеси	CRM, e-commerce, хмарні сервіси	Банки, торгівля, освіта
Цифрова трансформація (з 2010-х)	Перебудова бізнес-моделей, використання великих даних	Big Data, AI, IoT, Blockchain	Логістика, виробництво, охорона здоров’я
Цифрові екосистеми (2020+)	Мережеві бізнес-моделі, партнерство і даноцентричність	Екосистеми, відкриті API, платформізація	Технологічні гіганти, фінтех, смарт-міста

Цифрова трансформація розвивається як багаторівневий процес, у якому кожен наступний етап не заперечує, а доповнює попередній. Якщо автоматизація та цифровізація були зосереджені на оптимізації витрат та підвищенні продуктивності, то сучасна трансформація спрямована на створення нових форм цінності через інтеграцію у цифрові екосистеми.

Незважаючи на очевидні переваги, цифрова трансформація підприємств супроводжується низкою викликів і ризиків, що уповільнюють її впровадження. Серед основних бар’єрів у науковій літературі виділяють недостатність інвестицій**,** кадровий дефіцит та ризики кібербезпеки [12]. За даними PwC, понад 55 % компаній у країнах, що розвиваються, відзначають нестачу фінансування цифрових проєктів як ключову проблему [13].

Кадровий аспект є не менш критичним: цифрова трансформація потребує нових компетенцій у сфері управління даними, аналітики, кіберзахисту та використання штучного інтелекту. Проте навчальні програми у багатьох країнах ще не повністю відповідають вимогам цифрової економіки, що призводить до браку кваліфікованих фахівців [14].

Окремим викликом виступає забезпечення кібербезпеки. Масове впровадження IoT-рішень, хмарних обчислень і відкритих API підвищує вразливість бізнесу до кіберзагроз. За даними IBM, у 2023 році середня вартість витрат компаній на подолання наслідків витоку даних становила понад 4,5 млн дол. США [15].

Разом із тим цифрова трансформація відкриває значні перспективи. По-перше, вона забезпечує зростання продуктивності та ефективності за рахунок оптимізації бізнес-процесів. По-друге, створює нові бізнес-моделі, що базуються на цифрових платформах і сервісах. По-третє, сприяє формуванню інноваційних екосистем, у яких підприємства інтегруються з науковими установами, стартапами, державними інституціями. Нарешті, цифрова трансформація дозволяє підприємствам підвищити стійкість до кризових явищ та швидше адаптуватися до змін зовнішнього середовища.

Узагальнено ключові драйвери та бар'єри цифрової трансформації представлено на рисунку 1.2.

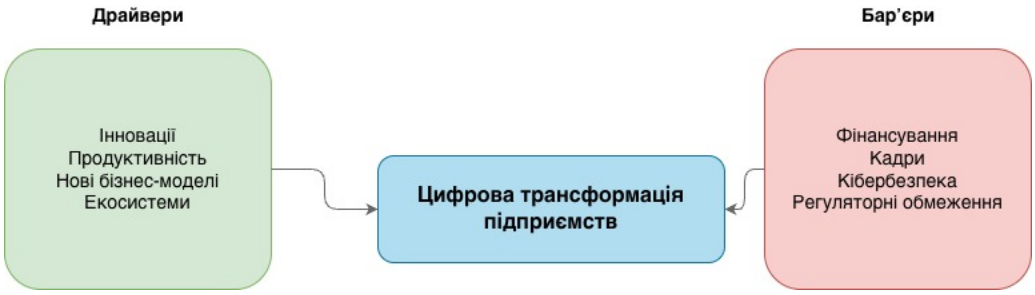


Рисунок 1.2 – Драйвери та бар'єри цифрової трансформації підприємств

Цифрова трансформація постає як суперечливий процес, що вимагає від підприємств значних ресурсів, проте водночас відкриває нові стратегічні можливості. Подолання бар'єрів можливе завдяки комплексному підходу, що поєднує інвестиції в технології, розвиток людського капіталу та забезпечення належного рівня кіберзахисту. Саме це формує передумови для успішного переходу підприємств України до цифрової економіки та інтеграції у глобальні цифрові ринки.

1.2. Теоретичні підходи до агент-орієнтованого моделювання соціально-економічних систем

Агент-орієнтоване моделювання (АОМ, англ. *Agent-Based Modeling, ABM*) є одним з ключових напрямів дослідження складних соціально-економічних систем у сучасній науці. Його сутність полягає у побудові моделей, де основними структурними елементами виступають агенти – автономні об’єкти, що володіють певними характеристиками, здатністю приймати рішення та взаємодіяти між собою і середовищем [16]. Такий підхід дозволяє досліджувати колективну поведінку системи, що виникає в результаті мікрорівневих взаємодій.

Витоки АОМ сягають досліджень у сфері штучного інтелекту та комп’ютерних наук. У 1970–1980-х роках були сформовані перші концепції моделювання складних систем на основі автономних агентів (J. Holland, J. Conway). Зокрема, відома модель «Game of Life» Дж. Конвея показала, що навіть прості правила взаємодії можуть призводити до складних патернів поведінки [17]. Подальший розвиток підходу відбувався у роботах С. Епштейна та Р. Аксельрода, які заклали основу використання агентних моделей у соціальних науках [18].

Головними принципами АОМ є:

– автономність агентів, кожен елемент самостійно приймає рішення;

– гетерогенність, агенти відрізняються за характеристиками та стратегіями;

– адаптивність, здатність змінювати поведінку у відповідь на зміни середовища;

– взаємодія, наявність комунікації між агентами та з навколишнім середовищем.

Ці особливості роблять агент-орієнтовані моделі зручним інструментом для аналізу систем, у яких важко передбачити наслідки індивідуальних рішень без урахування колективної динаміки.

У науковій літературі виділяють низку переваг АОМ над класичними економіко-математичними моделями. По-перше, вони дозволяють моделювати нелінійні процеси та ефекти самоорганізації. По-друге, уможливлюють врахування індивідуальних особливостей економічних агентів, які ігноруються у макроекономічних рівняннях. По-третє, дають можливість тестування різних сценаріїв розвитку системи у штучному середовищі [19].

Узагальнену характеристику ключових відмінностей між традиційними та агент-орієнтованими моделями наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння традиційних та агент-орієнтованих моделей

Критерій	Традиційні моделі	Агент-орієнтовані моделі
Структура	Сукупність рівнянь	Система автономних агентів
Рівень аналізу	Переважно макро	Мікро + мезо + макро
Тип поведінки	Раціональна, усереднена	Гетерогенна, адаптивна
Взаємодія	Абстрактна, агрегована	Реалістична, симульована
Результати	Середні значення	Емерджентні патерни

Таким чином, агент-орієнтоване моделювання розглядається як методологія, що дозволяє подолати обмеження традиційних моделей і забезпечує комплексне вивчення соціально-економічних систем, у яких вирішальну роль відіграють індивідуальна поведінка та взаємодія суб’єктів.

Перші спроби використати агент-орієнтоване моделювання (АОМ) у соціально-економічних дослідженнях з’явилися у 1980–1990-х роках. Вони були пов’язані з розвитком обчислювальної техніки та появою можливості імітації складних систем із великою кількістю взаємодіючих суб’єктів. Класичним прикладом є модель *Sugarscape*, розроблена Дж. Епштейном та Р. Аксельродом, яка показала, що навіть прості індивідуальні правила поведінки можуть призводити до формування соціальних структур, розподілу ресурсів та економічної ієрархії [18].

У 1990-х роках формується напрям агент-орієнтованої економіки (Agent-Based Computational Economics, ACE), який розвивався завдяки роботам Л. Тесфатсіона. Вчений визначав ACE як методологію дослідження економічних

процесів «знизу догори», тобто шляхом моделювання індивідуальних дій та їхніх агрегованих наслідків [19, 20]. Такий підхід дозволив вивчати явища, які важко пояснити за допомогою традиційних рівноважних моделей, зокрема ефекти колективної поведінки, ринкові «бульбашки» та фінансові кризи.

Подальший розвиток агент-орієнтованих моделей в економіці пов'язаний із дослідженнями фінансових ринків. Так, моделі Л. ЛєБарона відтворювали поведінку трейдерів з різними стратегіями, що дозволило пояснити виникнення волатильності та нестабільності цін [21]. У сфері макроекономіки АОМ застосовувалося для моделювання динаміки зайнятості, інновацій та економічного зростання (роботи Д. Досі та співавторів) [22].

З 2000-х років агент-орієнтоване моделювання стало активно інтегруватися у дослідження соціально-економічних систем на мікро- та мезорівні. З'явилися моделі поширення інновацій, аналізу конкурентної поведінки підприємств, моделювання ланцюгів постачання. Важливим кроком стало використання АОМ для підтримки прийняття рішень у сфері економічної політики, зокрема для прогнозування наслідків регуляторних змін або податкових реформ [23].

Узагальнену динаміку розвитку агент-орієнтованого підходу в економіці відображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Етапи розвитку агент-орієнтованого підходу в економічних дослідженнях

Агент-орієнтоване моделювання поступово перетворилося з інструменту комп'ютерної симуляції на методологічний підхід, який використовується у провідних економічних дослідженнях. Сьогодні воно є одним з основних інструментів аналізу складних систем у цифровій економіці.

Агент-орієнтовані моделі (АОМ) застосовуються в економіці на різних рівнях аналізу, що дозволяє комплексно вивчати процеси від поведінки індивідуальних суб'єктів до макроекономічних тенденцій. Залежно від об'єкта дослідження та поставлених завдань, у науковій літературі виділяють три основні рівні застосування АОМ: мікрорівень, мезорівень та макрорівень [24].

На мікрорівні АОМ використовуються для дослідження поведінки індивідуальних економічних агентів – споживачів, домогосподарств, підприємств. Такі моделі дозволяють аналізувати процеси прийняття рішень, дифузії інновацій, формування цінових стратегій. Наприклад, дослідження В. Гілберта та К. Тріпса демонструють, як моделювання окремих споживачів допомагає прогнозувати розвиток ринку нових товарів [25].

На мезорівні агент-орієнтовані моделі зосереджені на вивченні взаємодії підприємств та організацій у межах окремих галузей або регіонів. Це дозволяє аналізувати конкурентні стратегії, формування кластерів, розвиток ланцюгів постачання. Д. Гаврет та співавтори показали, що завдяки АОМ можливо моделювати стійкість галузевих мереж до шоків, включаючи порушення логістики та фінансові кризи [26].

На макрорівні агент-орієнтоване моделювання використовується для аналізу економічної динаміки в масштабах національної або світової економіки. Моделі цього рівня застосовуються для прогнозування безробіття, економічного зростання, ефективності державної політики. Наприклад, модель Eurace, розроблена спільними зусиллями європейських дослідників, дозволяє відтворювати процеси макроекономічного розвитку з урахуванням гетерогенності агентів [27].

Узагальнену класифікацію агент-орієнтованих моделей за рівнями аналізу представлено в таблиці 1.4.

Класифікація АОМ за рівнями аналізу дозволяє глибше зрозуміти їх потенціал і специфіку застосування у соціально-економічних дослідженнях. Кожен рівень доповнює інший, формуючи цілісну картину функціонування економічних систем у динамічному середовищі.

Таблиця 1.4 – Класифікація агент-орієнтованих моделей у соціально-економічних системах

Рівень аналізу	Об’єкти дослідження	Приклади застосування	Приклади моделей
Мікрорівень	Споживачі, домогосподарства, підприємства	Прийняття рішень, дифузія інновацій, ціноутворення	Gilbert & Troitzsch (2005) [25]
Мезорівень	Галузі, кластери, регіональні економіки	Конкуренція, ланцюги постачання, стійкість мереж	Gavré et al. (2020) [26]
Макрорівень	Національна/світова економіка	Безробіття, економічне зростання, державна політика	Eurace Model [27]

У XXI столітті агент-орієнтоване моделювання (АОМ) перетворилося на один із провідних інструментів дослідження складних соціально-економічних процесів, особливо у контексті цифрової економіки. Його використання дозволяє імітувати поведінку економічних агентів у середовищі швидких технологічних змін, цифровізації бізнесу та розвитку мережевих структур.

Фінансові ринки та фінтех. АОМ широко застосовується для моделювання динаміки фінансових ринків. Такі моделі враховують гетерогенність стратегій трейдерів, наявність інформаційної асиметрії та вплив поведінкових факторів. Наприклад, дослідження Б. ЛєБарона демонструють, як агентні моделі здатні пояснити волатильність та формування «цінових бульбашок» [28]. У фінтех-секторі АОМ використовується для моделювання платіжних систем, кредитних ризиків та розподілу інвестицій.

Логістика та ланцюги постачання. У сфері логістики АОМ допомагає досліджувати стійкість глобальних ланцюгів постачання до шоків, пов’язаних із пандеміями чи воєнними діями. Наприклад, у моделі Г. Дезіеля агентами виступають постачальники, виробники та перевізники, чия взаємодія дозволяє виявити «вузькі місця» у постачанні та оптимізувати розподіл ресурсів [29].

Смарт-сіті та міська економіка. Агентні моделі активно використовуються для аналізу урбаністичних процесів: управління транспортними потоками, енергоспоживанням, розподілом міських ресурсів. Дослідження С. Батті показують, що симуляції поведінки жителів у цифрових моделях міст

допомагають планувати розвиток інфраструктури та оцінювати вплив урбанізації на екологію [30].

ESG та сталий розвиток. Зростає роль АОМ у дослідженні соціально-екологічних систем, зокрема для оцінки екологічного сліду підприємств, моделювання переходу до «зеленої економіки» та аналізу корпоративної відповідальності. Такі моделі дозволяють враховувати інтереси різних груп стейкхолдерів – бізнесу, громади, держави [31].

Узагальнені сфери застосування агент-орієнтованого моделювання в цифровій економіці представлені на рисунку 1.4.

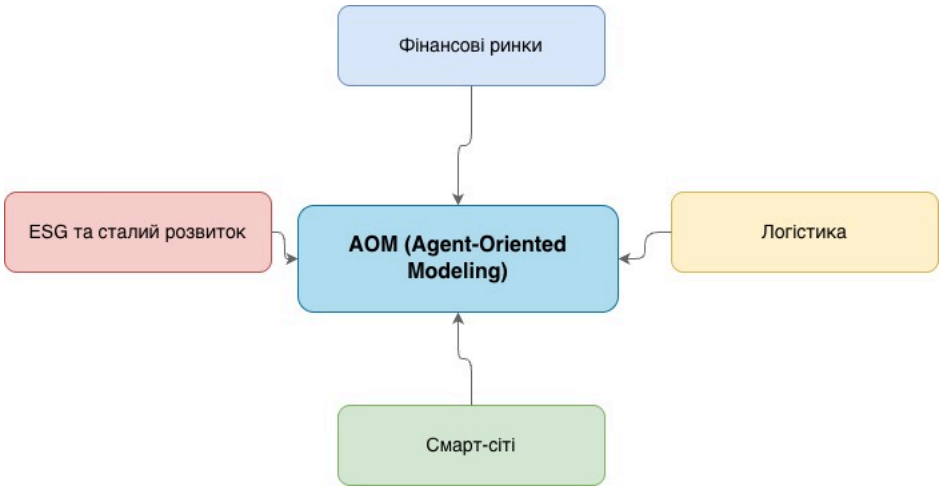


Рисунок 1.4 – Сфери застосування агент-орієнтованого моделювання у цифровій економіці

Сучасний розвиток АОМ демонструє його універсальність і гнучкість у дослідженні цифрової економіки. Використання агентних моделей дозволяє не лише аналізувати поточні процеси, а й формувати сценарії майбутнього розвитку підприємств, галузей і цілих національних економік.

1.3. Зарубіжний і вітчизняний досвід застосування моделей цифрової трансформації

У країнах Європейського Союзу, США та Азії цифрова трансформація давно розглядається як стратегічний пріоритет економічного розвитку. Більшість урядів розробили національні стратегії цифровізації, які інтегрують наукові підходи до моделювання трансформаційних процесів у бізнесі та державному секторі.

Європейський Союз. У межах ЄС ключовою ініціативою стала програма *Digital Europe Programme (2021–2027)*, спрямована на розвиток цифрових інфраструктур, штучного інтелекту, кібербезпеки та цифрових навичок. Важливим напрямом є підтримка малих і середніх підприємств через так звані *Digital Innovation Hubs*, які пропонують моделі цифрової трансформації для бізнесу, включаючи симуляційні сценарії та оцінку економічного ефекту [32]. У країнах ЄС активно використовуються моделі оцінки цифрової зрілості підприємств (*Digital Maturity Models*), що дозволяють оцінити рівень цифровізації за критеріями стратегій, процесів, технологій і компетенцій персоналу [33].

США. У США цифрова трансформація орієнтована передусім на інноваційні бізнес-моделі та розвиток платформної економіки. Згідно з даними *MIT Sloan Management Review*, американські компанії, які активно використовують аналітику даних і агент-орієнтовані моделі у своїх стратегіях, демонструють на 26 % вищий рівень прибутковості порівняно з конкурентами [34]. Значна увага приділяється використанню агент-орієнтованих симуляцій для прогнозування поведінки клієнтів, управління ланцюгами постачання та адаптації бізнесу до ринкових змін.

Азія. У Китаї та Південній Кореї цифрова трансформація розглядається як основа національної конкурентоспроможності. Зокрема, Китай реалізує програму *Made in China 2025*, яка передбачає впровадження моделей *smart manufacturing*, заснованих на принципах Industry 4.0 та агент-орієнтованому

моделюванні виробничих процесів [35]. У Південній Кореї акцент робиться на цифрові «смарт-міста», де моделі трансформації інтегрують транспорт, енергетику та міське планування.

Узагальнений аналіз ключових зарубіжних практик цифрової трансформації наведено в таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Зарубіжний досвід застосування моделей цифрової трансформації

Регіон / країна	Основна програма	Характеристика моделі	Приклади застосування
ЄС	Digital Europe Programme	Моделі цифрової зрілості, інноваційні хаби	Оцінка цифровізації МСП, кібербезпека
США	Платформна економіка, big data	Агент-орієнтовані симуляції, аналітика	Управління клієнтським досвідом, supply chain
Китай	Made in China 2025	Industry 4.0, smart manufacturing	Виробничі кластери, автоматизовані заводи
Південна Корея	Smart Cities	Інтеграційні цифрові моделі	Транспорт, енергетика, урбаністика

Зарубіжний досвід доводить, що моделювання цифрової трансформації є не лише академічним напрямом, але й практичним інструментом державної політики та стратегій бізнесу. Найбільш успішними виявляються ті країни та компанії, які інтегрують цифрові моделі у процеси прийняття рішень на всіх рівнях управління.

Цифрова трансформація підприємств у світі часто розглядається через досвід провідних корпорацій, які змогли інтегрувати цифрові технології та моделювання у свої бізнес-стратегії. Ці компанії демонструють, як поєднання технологічних інновацій і системного підходу до управління дозволяє формувати конкурентні переваги.

Siemens (Німеччина). Компанія Siemens є одним із світових лідерів у впровадженні концепції *Industry 4.0*. Вона розробила платформу *MindSphere*, що базується на Інтернеті речей і агент-орієнтованих моделях для управління виробничими процесами. Використання симуляцій дозволяє прогнозувати

технічні несправності, оптимізувати витрати енергії та підвищувати продуктивність виробництва [36].

Amazon (США). Amazon побудував свою бізнес-модель на основі цифрової платформи, де ключову роль відіграють аналітика великих даних і агентні моделі поведінки споживачів. Компанія використовує моделювання для персоналізації рекомендацій, управління логістикою та оптимізації складських операцій. Згідно з даними *Harvard Business Review*, саме інтеграція моделей цифрової трансформації дозволила Amazon скоротити логістичні витрати на 30 % та забезпечити зростання клієнтської лояльності [37].

Maersk (Данія). Лідер у сфері логістики Maersk активно застосовує цифрові моделі для оптимізації глобальних ланцюгів постачання. Компанія розробила платформу *TradeLens* (спільно з IBM), яка базується на блокчейн-технологіях і дозволяє відслідковувати вантажі у реальному часі. Агент-орієнтоване моделювання використовується для аналізу ризиків та прогнозування наслідків перебоїв у глобальній торгівлі [38].

Samsung (Південна Корея). Samsung застосовує цифрові моделі в управлінні інноваційними проєктами та створенні «розумних фабрик». Компанія інвестує у симуляційні моделі виробничих процесів, які дозволяють адаптувати виробництво до змін попиту. Це дозволило скоротити час виведення нових продуктів на ринок майже на 40 % [39].

Узагальнені приклади застосування моделей цифрової трансформації у провідних корпораціях представлені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 – Приклади цифрової трансформації у світових корпораціях

Компанія	Основний інструмент	Сфера застосування	Результат
Siemens	MindSphere, IoT, Industry 4.0	Виробництво, енергетика	Оптимізація витрат, прогнозування несправностей
Amazon	Big Data, агентні моделі	Логістика, клієнтські сервіси	Персоналізація, зниження витрат на 30 %
Maersk	TradeLens, Blockchain	Логістика, глобальні ланцюги	Прозорість постачань, зниження ризиків
Samsung	Smart factories, симуляційні моделі	Виробництво, інновації	Скорочення часу виходу продукту на ринок

Досвід провідних корпорацій підтверджує, що застосування агент-орієнтованих моделей і цифрових платформ дає змогу забезпечити гнучкість, інноваційність і високу стійкість бізнесу в умовах глобальної конкуренції.

В Україні цифрова трансформація підприємств відбувається у тісному зв'язку з реалізацією державних програм цифровізації та розвитком бізнес-ініціатив у промисловості, фінансах і сфері послуг. Починаючи з 2019 року, з ухваленням стратегії «Цифрова держава» та створенням Міністерства цифрової трансформації України, цифровізація стала одним з пріоритетів національної економічної політики [40].

Державні програми. Одним із ключових інструментів стала ініціатива «Дія», яка поєднує мобільний застосунок і портал електронних послуг. Завдяки цій платформі Україна увійшла до топ-10 країн Європи за рівнем розвитку цифрових державних сервісів [41]. Для підприємств «Дія.Бізнес» пропонує моделі цифрової трансформації, включаючи консультації, бізнес-симулятори та навчальні програми для МСП.

Банківський сектор. Українські банки стали піонерами цифрової трансформації. Зокрема, *ПриватБанк* одним із перших у світі запровадив дистанційне банківське обслуговування через платформу «Приват24». У 2021 р. *Monobank* використав гейміфіковані моделі залучення клієнтів у цифровому середовищі, що забезпечило швидке зростання його частки на ринку [42]. Ці приклади доводять ефективність цифрових моделей взаємодії зі споживачами у фінансовій сфері.

Промисловість та енергетика. У промислових підприємствах України поступово впроваджуються елементи *Industry 4.0*. Зокрема, компанія *Інтерпайп* застосовує цифрові моделі управління виробничими процесами, а ДТЕК впровадив систему *Digital DTEK*, яка базується на інтернеті речей, аналітиці великих даних та прогнозному технічному обслуговуванні [43].

Сфера IT та телекомунікацій. Українські IT-компанії також активно розвивають цифрові моделі. EPAM та SoftServe створюють симуляційні рішення для європейських та американських клієнтів, застосовуючи агент-орієнтоване

моделювання для управління процесами у фінансах і логістиці. У телеком-секторі «Київстар» використовує big data та predictive analytics для оптимізації клієнтських сервісів [44].

Узагальнений аналіз українського досвіду цифрової трансформації наведено у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Український досвід цифрової трансформації підприємств

Сфера	Приклад	Використані моделі	Результат
Державні сервіси	«Дія», «Дія.Бізнес»	Цифрові платформи, бізнес-симулятори	Автоматизація послуг, підтримка МСП
Банківський сектор	ПриватБанк, Monobank	Цифрові клієнтські моделі, гейміфікація	Лідерство у digital-банкінгу
Промисловість	Інтерпайп, ДТЕК	Industry 4.0, IoT, predictive maintenance	Оптимізація витрат, підвищення продуктивності
IT та телеком	SoftServe, Київстар	Агентні моделі, big data, predictive analytics	Нові сервіси, зростання клієнтської лояльності

Український досвід свідчить про динамічний розвиток цифрової трансформації, попри економічні та політичні виклики. Найбільшого прогресу досягнуто у фінансовому секторі, державних послугах та IT-індустрії, тоді як промисловість перебуває на етапі поступової адаптації до вимог *Industry 4.0*.

Порівняння зарубіжних і вітчизняних практик цифрової трансформації свідчить про наявність як спільних рис, так і суттєвих відмінностей у підходах до її реалізації.

Спільні риси. По-перше, і в Україні, і в зарубіжних країнах цифрова трансформація розглядається як стратегічний пріоритет розвитку економіки. Як у ЄС, так і в Україні створюються цифрові платформи для бізнесу та державних послуг (*Digital Innovation Hubs*, «Дія.Бізнес»). По-друге, в обох випадках застосовуються моделі цифрової зрілості для оцінки рівня цифровізації підприємств і визначення напрямів розвитку [33].

Відмінності. Головна відмінність полягає у масштабах інвестицій і рівні інтеграції цифрових технологій у бізнес-процеси. У США та країнах ЄС значна частина корпорацій впроваджує агент-орієнтовані симуляції та індустріальні

платформи *Industry 4.0* (Siemens, Maersk, Amazon), тоді як в Україні цифрова трансформація сконцентрована переважно у фінансовому секторі та сфері державних послуг. Промислові підприємства України поки що перебувають на етапі часткової автоматизації та адаптації до цифрових рішень [45].

Перспективи розвитку. Україна має потенціал інтеграції у глобальні цифрові ринки завдяки потужному IT-сектору, зростаючій ролі стартапів та підтримці з боку міжнародних партнерів. На відміну від розвинених економік, українські підприємства можуть здійснити так званий «технологічний стрибок», використовуючи сучасні моделі трансформації без проходження усіх проміжних етапів [46]. Це особливо актуально для галузей енергетики, агропромислового комплексу та логістики.

Узагальнене порівняння зарубіжного та українського досвіду наведено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Порівняння зарубіжного та українського досвіду цифрової трансформації

Зарубіжні практики демонструють більш високий рівень інтеграції цифрових технологій та використання складних моделей (агент-орієнтовані симуляції, цифрові двійники), тоді як український досвід більше орієнтований на забезпечення базових цифрових сервісів та підтримку бізнесу. Перспективним напрямом для України є поєднання напрацьованих світових моделей із власним інноваційним потенціалом IT-галузі, що дозволить прискорити адаптацію промислових підприємств до вимог цифрової економіки.

1.4. Висновки до розділу 1

У першому розділі дослідження було розглянуто теоретичні основи цифрової трансформації підприємств, що дало змогу сформувати цілісне уявлення про сутність цього процесу, методологічні підходи до його моделювання та зарубіжний і вітчизняний досвід впровадження.

По-перше, проаналізовано сутність і концепції цифрової трансформації. Встановлено, що вона виходить за межі звичайної автоматизації та цифровізації і означає комплексну зміну бізнес-моделі підприємства на основі використання цифрових технологій. Сучасні концепції (Industry 4.0, платформна економіка, екосистемний підхід) забезпечують інтеграцію кіберфізичних систем, великих даних і цифрових платформ у виробничі та управлінські процеси, створюючи нові форми економічної цінності. Також визначено основні виклики цифрової трансформації – кадровий дефіцит, обмеженість інвестицій, ризики кібербезпеки – та перспективи, що полягають у зростанні продуктивності, формуванні нових бізнес-моделей і розбудові цифрових екосистем.

По-друге, розглянуто теоретичні підходи до агент-орієнтованого моделювання (АОМ) соціально-економічних систем. Показано, що АОМ дозволяє досліджувати динаміку складних систем шляхом моделювання взаємодії автономних агентів, що мають власні характеристики й стратегії. Визначено переваги цього підходу над традиційними економіко-математичними моделями: можливість урахування гетерогенності, адаптивності, нелінійності та ефектів самоорганізації. Проведено класифікацію АОМ за рівнями аналізу (мікро-, мезо-, макро) та окреслено сучасні напрями їх застосування у цифровій економіці – фінансові ринки, логістика, міське управління, ESG-моделі сталого розвитку.

По-третє, досліджено зарубіжний і український досвід застосування моделей цифрової трансформації. У зарубіжній практиці цифрова трансформація є інтегрованою складовою державних стратегій (Digital Europe, Made in China 2025, Smart Cities) та корпоративних політик (Siemens, Amazon, Maersk,

Samsung). Український досвід демонструє прогрес у державних сервісах («Дія»), банківському секторі (ПриватБанк, Monobank), а також у промисловості (Інтерпайп, ДТЕК) та IT-галузі (SoftServe, EPAM). Порівняльний аналіз засвідчив, що головними відмінностями є масштаби інвестицій і рівень інтеграції цифрових технологій: тоді як у ЄС та США домінують комплексні моделі *Industry 4.0* та цифрові екосистеми, в Україні цифрова трансформація сконцентрована на базових послугах і фінансових технологіях. Водночас, завдяки потужному IT-сектору, Україна має потенціал здійснити «технологічний стрибок» у промислових галузях.

Отже, результати розділу підтверджують, що цифрова трансформація є ключовим чинником розвитку підприємств у глобальній економіці. Використання агент-орієнтованих моделей дозволяє адекватно описати динаміку соціально-економічних систем і сприяє формуванню ефективних стратегій цифровізації бізнесу. Зарубіжний та український досвід свідчать про необхідність адаптації найкращих практик до національних умов, що створює основу для подальшої практичної реалізації моделей цифрової трансформації у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2
РОЗРОБКА АГЕНТ-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

2.1. Постановка задачі моделювання та визначення ключових факторів цифрової трансформації

Цифрова трансформація промислових підприємств передбачає не лише технічне оновлення виробництва, а й комплексну зміну управлінських, організаційних і поведінкових механізмів. Для опису цих процесів доцільно застосовувати агент-орієнтоване моделювання (Agent-Based Modeling, ABM), що дозволяє відтворити взаємодію різних груп учасників цифрової екосистеми підприємства та оцінити наслідки управлінських рішень у динаміці [47].

У межах даного дослідження розглядається підприємство ПрАТ «ІнноваПром», яке перебуває на етапі формування власної цифрової стратегії. Основною метою моделювання є визначення взаємозв'язків між рівнем цифрової зрілості підприємства та його економічними результатами, а також оцінка економічного ефекту (ЕЕ) від цифрової трансформації у різних сценаріях розвитку.

1. Концепція агент-орієнтованого підходу. У моделі підприємство розглядається як сукупність агентів, які взаємодіють у межах спільної цифрової екосистеми:

керівництво – ухвалює рішення про інвестиції в цифровізацію;

працівники – формують рівень цифрових компетенцій (*DCI)*;

партнери – впливають на ступінь інтеграції процесів (*DPI*);

клієнти – визначають динаміку попиту й доходу;

регулятори – задають зовнішні умови функціонування.

Взаємодія цих агентів описується через ключові показники, що відображають внутрішні й зовнішні ефекти цифрової трансформації.

2. Система показників моделі. Для кількісного опису процесів цифрової трансформації використано систему індикаторів:

DCI (Digital Competence Index) – рівень цифрових компетенцій персоналу;

DPI (Digital Process Integration) – ступінь цифрової інтеграції бізнес-процесів;

DMI (Digital Maturity Index) – інтегральний показник цифрової зрілості;

IE (Innovation Efficiency) – ефективність інноваційної діяльності;

EE (Economic Effect) – економічний ефект від цифрової трансформації.

Індекси взаємопов'язані, зокрема:

$$DMI = 0.5 \cdot DCI + 0.5 \cdot DPI, \tag{2.1}$$

а економічний ефект визначається як сума приросту доходу та економії витрат:

$$EE = \Delta Q + \Delta C. \tag{2.2}$$

Ці залежності є базовими для подальших етапів моделювання.

Задача моделювання формулюється так:

Знайти траєкторії зміни показників DCI_t, DPI_t, DMI_t, IE_t, EE_t у часовому періоді $t=1...T$ залежно від стратегічних параметрів цифрових інвестицій γ (1–5 % від доходу) та темпів зростання ринку g.

Формально, модель має вигляд системи:

$$\begin{cases} DCI_t = f_1(DCI_{t-1}, I_{learn,t}), \\ DPI_t = f_2(DPI_{t-1}, I_{tech,t}), \\ DMI_t = 0,5\,DCI_t + 0,5\,DPI_t, \\ EE_t = \Delta Q_t + \Delta C_t, \\ IE_t = \dfrac{EE_t}{I_{learn,t} + I_{tech,t}}. \end{cases} \tag{2.3}$$

У моделі передбачено три сценарії розвитку:

оптимістичний – 5 % цифрових інвестицій, високий попит, активне навчання;

базовий – 2 % інвестицій, помірне зростання ринку;

стриманий – 1 % інвестицій, повільна цифровізація.

Результати сценарного моделювання відображають динаміку цифрової зрілості (*DMI*) та економічного ефекту (*EE*), що далі досліджується в розділі 3.

На основі аналізу теоретичних і практичних джерел [48–51] виділено чотири групи факторів, які безпосередньо впливають на результати цифрової трансформації:

Організаційно-управлінські – стратегія, лідерство, готовність до змін.

Технологічні – ступінь автоматизації, інтеграція *ERP*, *CRM*, *IoT*.

Кадрові – рівень цифрових компетенцій персоналу.

Економічні – обсяг інвестицій, ефективність інновацій, ринкові умови.

Саме ці фактори включено до структури агентів моделі (розділ 2.2), а їхня взаємодія оцінюється за допомогою сценарного підходу (розділ 2.3) і практичної апробації (розділ 3).

2.2. Побудова агент-орієнтованої моделі цифрової екосистеми підприємства

Цифрова екосистема підприємства являє собою складну систему взаємодії внутрішніх і зовнішніх суб’єктів, об’єднаних цифровими технологіями для створення спільної цінності. У контексті агент-орієнтованого моделювання (АОМ) така екосистема описується через множину агентів, які мають автономність, гетерогенність та здатність до адаптивної поведінки [52].

За результатами аналізу сучасних наукових підходів [53; 54], до складу цифрової екосистеми підприємства доцільно включити такі основні групи агентів:

1. Керівництво підприємства (*Management Agents*). Їхні функції полягають у стратегічному плануванні, розподілі інвестицій у цифрові технології та визначенні ключових пріоритетів трансформації. Вони приймають рішення щодо бюджетів, вибору технологій (ERP, CRM, IoT, AI) та взаємодії з партнерами.

2. Працівники (*Employee Agents*). Вони забезпечують виконання операційних завдань і є ключовим фактором успіху цифровізації, оскільки їхній рівень цифрових компетенцій (індекс DCI) визначає ефективність впровадження технологій. Поведінка працівників характеризується адаптивністю: готовністю навчатися, приймати інновації або, навпаки, чинити опір змінам [55].

3. Клієнти (*Customer Agents*). Представляють зовнішнє середовище, що формує попит на цифрові послуги та продукти. Їхня поведінка залежить від рівня задоволеності якістю сервісу, швидкістю доставки, персоналізацією продуктів. У моделі клієнти реагують на зміни у пропозиції та рівні цифрової зрілості підприємства.

4. Партнери та постачальники (*Partner/Supplier Agents*). Це зовнішні агенти, які забезпечують підприємство ресурсами та інноваційними рішеннями. Їхні взаємодії відображають рівень інтеграції у ланцюгах постачання (індекс DPI).

5. Регулятори та держава (Regulator Agents). Здійснюють вплив через нормативно-правові вимоги, цифрові стандарти та інституційне середовище. Вони можуть стимулювати розвиток цифрової економіки (наприклад, податкові пільги на інновації) або створювати бар’єри.

Узагальнена структура цифрової екосистеми підприємства у вигляді агентів та їхніх взаємодій показана на рисунку 2.1.

Важливою властивістю екосистеми є наявність зворотних зв’язків. Наприклад, рішення керівництва про збільшення інвестицій у цифрові технології (IT) підвищує рівень цифрових компетенцій персоналу (*DCI*), що у свою чергу покращує задоволеність клієнтів і стимулює зростання попиту. Одночасно підвищення цифрової зрілості підприємства (*DMI*) робить його більш

привабливим для партнерів, що посилює інтеграцію у ланцюгах постачання (*DPI*).

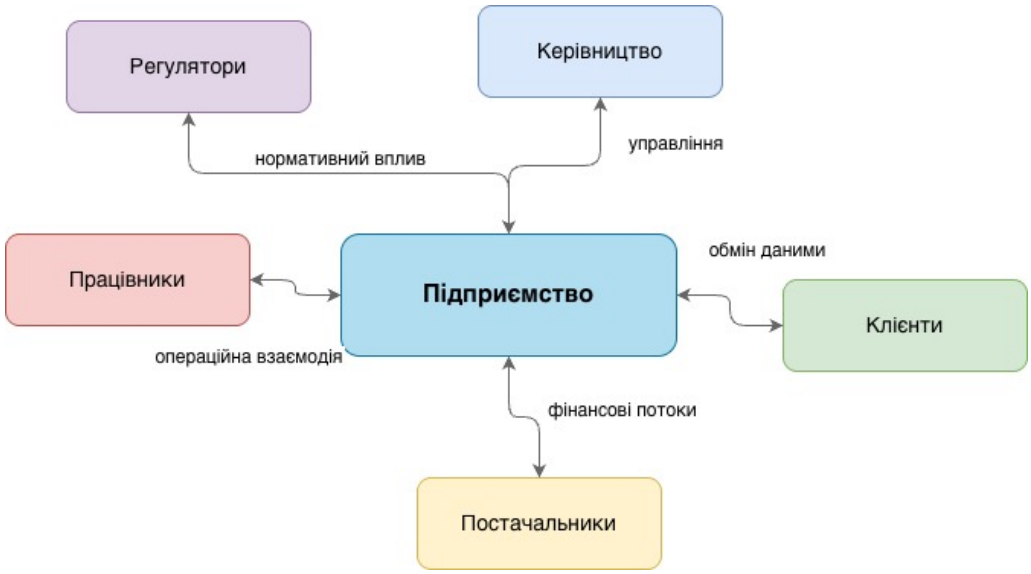


Рисунок 2.1 – Агентна структура цифрової екосистеми підприємства

Для подальшої побудови моделі важливо описати атрибути кожного агента. Наприклад, агенти-працівники характеризуються рівнем компетенцій, мотивацією та схильністю до навчання; агенти-клієнти – чутливістю до ціни та якості сервісу; керівництво – орієнтацією на інновації чи консервативністю у стратегіях.

Узагальнені характеристики агентів подано у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні агенти цифрової екосистеми підприємства та їх характеристики

Агент	Основні атрибути	Роль у моделі
Керівництво	Бюджет, стратегія, ризик-орієнтованість	Прийняття рішень про інвестиції (IT)
Працівники	Компетенції (DCI), мотивація, адаптивність	Виконання процесів, навчання
Клієнти	Попит, задоволеність, чутливість до сервісу	Формування доходу, вплив на DMI
Партнери/Постачальники	Інноваційність, надійність, інтегрованість	Ланцюги постачання (DPI)
Регулятори	Норми, стимули, бар’єри	Інституційний вплив на цифрову трансформацію

У межах агент-орієнтованої моделі кожен агент характеризується атрибутами стану (величинами, що описують його характеристики у певний момент часу) та правилами поведінки (алгоритмами прийняття рішень і реакцій на зміни у середовищі). Це дозволяє формалізувати складні процеси цифрової трансформації у вигляді симуляційної динаміки [56].

1. Керівництво підприємства (*Management Agents*)

Атрибути: бюджет *B*, стратегія цифровізації *S*, схильність до ризику *R*.

Правила поведінки:

– розподіляє бюджет на цифрові інвестиції *IT* за формулою

$$IT_t = \lambda \cdot B_t \cdot S_t, \tag{2.4}$$

де λ – коефіцієнт стратегічної орієнтації на цифровізацію;

– адаптує стратегію на основі попереднього економічного ефекту $EE_t{-}1$: якщо приріст > 5 %, частка інвестицій зростає, якщо < 0 – скорочується.

Вплив: формує початкові умови для розвитку цифрової зрілості (DMI).

2. Працівники (Employee Agents)

Атрибути: цифрові компетенції DCI, мотивація M, рівень навчання L.

Правила поведінки:

– оновлюють свій індекс компетенцій за формулою

$$DCI_{t+1} = DCI_t + \mu \cdot L_t \cdot IT_t, \tag{2.5}$$

де μ – коефіцієнт ефективності навчання;

– рівень мотивації зростає при позитивному впливі цифрових технологій на умови праці ($+\Delta M$) та знижується при надмірних навантаженнях ($-\Delta M$).

Вплив: визначають швидкість інтеграції цифрових процесів (DPI).

3. Клієнти (Customer Agents).

Атрибути: попит Q, задоволеність сервісом *Sat*, чутливість до ціни θ.

Правила поведінки:

– попит формується як функція від рівня цифрової зрілості підприємства:

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + \rho \cdot DMI_t) \cdot (1 - \theta \cdot P_t), \quad (2.6)$$

де P_t – ціна продукту/послуги;

– задоволеність зростає при покращенні якості сервісу (швидкість доставки, персоналізація), що прямо залежить від *DPI*.

Вплив: генерують дохід підприємства, стимулюючи розвиток цифрових сервісів.

4. Партнери та постачальники (*Partner/Supplier Agents*)

Атрибути: рівень інноваційності *Inn*, надійність *Rel*, інтегрованість у ланцюги *Int*.

Правила поведінки:

– приймають рішення про співпрацю, якщо

$$Int_t = f(DMI_t, Rel_t) > \tau, \quad (2.7)$$

де τ – порогове значення інтегрованості;

– при високому DMI підприємства збільшують свою інноваційну активність у партнерстві.

Вплив: визначають розширення цифрової екосистеми та ефективність supply chain (DPI).

5. Регулятори (Regulator Agents)

Атрибути: нормативні вимоги *Norm*, стимули *Sub*, обмеження *Cons*tr.

Правила поведінки:

– впливають на інвестиційні рішення підприємства через коригування B_t та IT_t;

– у разі державних субсидій (*Sub>0*) підвищується частка інвестицій у цифрові технології.

Вплив: створюють інституційне середовище, що може прискорювати або гальмувати цифровізацію.

Узагальнені атрибути та правила агентів наведено у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9 – Атрибути та поведінкові правила агентів цифрової екосистеми

Агент	Атрибути	Основні правила	Вплив на модель
Керівництво	*B, S, R*	Розподіл *IT*, коригування стратегії	Задає траєкторію цифрових інвестицій
Працівники	*DCI, M, L*	Оновлення *DCI*, адаптація мотивації	Впливають на *DPI*, *IE*
Клієнти	*Q, Sat, θ*	Попит залежить від *DMI*, ціни	Формують дохід
Партнери	*Inn, Rel, Int*	Співпраця при високому *DMI*	Посилюють *DPI*, інновації
Регулятори	*Norm,Sub,Constr*	Коригування *IT*, стимулювання інновацій	Інституційний вплив

Визначені атрибути та поведінкові правила агентів дозволяють побудувати симуляційну модель, яка відображає взаємодію економічних суб’єктів у цифровій екосистемі підприємства.

Ефективність цифрової трансформації підприємства визначається не лише індивідуальною поведінкою агентів, а й характером їхньої взаємодії. У рамках агент-орієнтованої моделі ці взаємодії реалізуються у вигляді зворотних зв’язків, які формують нелінійну динаміку системи [57].

1. Взаємодія керівництва та працівників:

– керівництво інвестує у цифрові технології (*IT*), що стимулює підвищення цифрових компетенцій персоналу (*DCI*).

– зростання компетенцій працівників підвищує ефективність використання цифрових рішень і сприяє інтеграції процесів (*DPI*).

– якщо інвестиції недостатні, мотивація персоналу (*M*) знижується, що уповільнює темпи цифровізації.

2. Взаємодія підприємства та клієнтів:

– якість сервісу (*Sat*) прямо залежить від рівня цифрової зрілості підприємства (*DMI*) та швидкості обробки запитів (впливає *DPI*).

– задоволені клієнти формують додатковий попит (*Q*), що призводить до зростання доходів підприємства і створює додаткові ресурси для інвестицій у цифровізацію.

– якщо рівень цифрової зрілості низький, клієнти зменшують попит, що формує негативний зворотний зв'язок.

3. Взаємодія з партнерами та постачальниками:

– високий рівень цифрової інтеграції підприємства (*DPI*) стимулює постачальників та партнерів до тіснішої співпраці.

– низький рівень цифрової зрілості (*DMI<0,4*) зменшує інтегрованість ланцюга постачання та знижує інноваційність партнерства.

– позитивний зворотний зв'язок виникає, коли підприємство зростає у цифровій зрілості, а партнери додають нові технології, підсилюючи розвиток екосистеми.

4. Взаємодія з регуляторами:

– регулятори можуть надавати стимули (*Sub*) або накладати обмеження (*Constr*), що змінює обсяг інвестицій підприємства у цифрові технології.

– наприклад, державна програма субсидій на впровадження ERP-рішень знижує навантаження на бюджет підприємства, стимулюючи швидше зростання *DMI*.

– у разі регуляторних бар'єрів (наприклад, вимоги до кібербезпеки без відповідної підтримки) зростають витрати, що може знизити економічний ефект (*EE*).

5. Система зворотних зв'язків. На основі описаних правил формується замкнене коло взаємодій (див. рисунок 2.2):

Позитивні петлі: інвестиції → компетенції → зрілість → клієнтська лояльність → доходи → нові інвестиції.

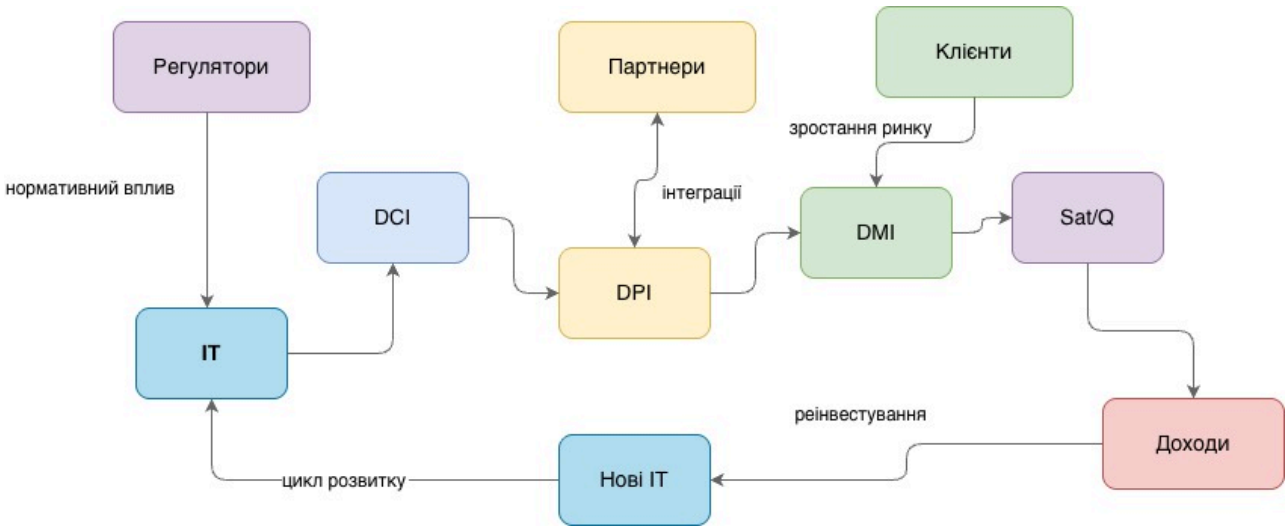


Рисунок 2.2 – Система зворотних зв’язків у цифровій екосистемі підприємства

Негативні петлі: низька мотивація працівників → низький DPI → падіння задоволеності клієнтів → зниження попиту → обмеження інвестицій.

Узагальнення правил взаємодії подано у таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Взаємодії агентів у цифровій екосистемі підприємства

Взаємодія	Ключові змінні	Характер зв’язку	Вплив
Керівництво → Працівники	*IT→DCI, M*	Прямий позитивний	Підвищення компетенцій і мотивації
Працівники → *DPI*	*DCI,M→DPI*	Прямий позитивний	Прискорення інтеграції процесів
Підприємство → Клієнти	*DMI,DPI→Sat, Q*	Прямий позитивний	Формування попиту
Клієнти → Підприємство	*Q→Доходи*	Прямий позитивний	Зростання ресурсів для інвестицій
Партнери ↔ Підприємство	*DPI, DMI, Inn→Int*	Взаємний позитивний	Поглиблення співпраці
Регулятори → Підприємство	*Sub, Constr→IT*	Умовно позитивний/негативний	Залежить від політики

Взаємодії агентів формують динамічну мережу зворотних зв’язків, яка забезпечує еволюцію цифрової екосистеми підприємства. Це дозволяє моделі відтворювати як зростаючі, так і стримуючі сценарії цифрової трансформації.

Побудова агент-орієнтованої моделі цифрової екосистеми підприємства передбачає не лише опис агентів і їхніх взаємодій, але й визначення алгоритму

симуляції, який дозволяє простежити динаміку змін у часі. Кожна ітерація моделі відповідає часовому кроку *t* (наприклад, 1 квартал), у межах якого агенти оновлюють свої атрибути згідно з правилами поведінки та взаємодії.

1.Алгоритм симуляції (рис. 2.3):

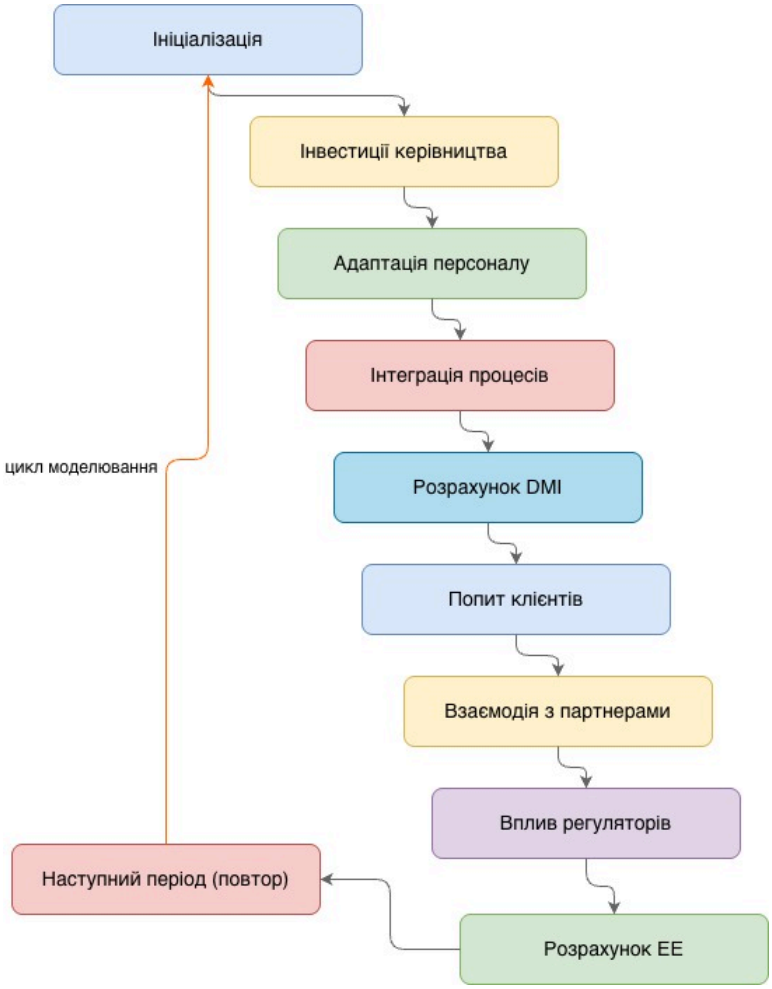


Рисунок 2.3 – Алгоритм симуляції агент-орієнтованої моделі

Крок 1. Ініціалізація.

Встановлення початкових значень факторів: IT_0, DCI_0, DPI_0, DMI_0, IE_0.

Задання бюджету підприємства B_0, кількості працівників, клієнтів, партнерів.

Визначення політики регуляторів (субсидії *Sub*, обмеження *Constr*).

Крок 2. Розподіл інвестицій керівництвом. Обсяг інвестицій у цифрові технології на період *t*:

$$IT_t = \lambda \cdot B_t \cdot S_t, \tag{2.8}$$

де λ – стратегічний коефіцієнт цифровізації.

Крок 3. Адаптація працівників.

Оновлення цифрових компетенцій:

$$DCI_{t+1} = DCI_t + \mu \cdot L_t \cdot IT_t. \tag{2.9}$$

Корекція мотивації залежно від результатів попереднього періоду.

Крок 4. Інтеграція процесів.

Оновлення індексу інтеграції:

$$DPI_{t+1} = \frac{N_d}{N_t}, \tag{2.10}$$

де N_d — кількість цифровізованих процесів у періоді.

Крок 5. Формування цифрової зрілості.

Розрахунок *DMI*:

$$DMI_{t+1} = \alpha \cdot DCI_{t+1} + \beta \cdot DPI_{t+1} + \gamma \cdot IT_t. \tag{2.11}$$

Крок 6. Реакція клієнтів.

Попит:

$$Q_t = Q_0 \cdot (1 + \rho \cdot DMI_t) \cdot (1 - \theta \cdot P_t). \tag{2.12}$$

Задоволеність клієнтів залежить від якості сервісу (функція від DPI).

Крок 7. Взаємодія з партнерами.

Рівень інтегрованості постачальників:

$$Int_t = f(DMI_t, Rel, Inn). \quad (2.13)$$

Якщо $Int_t > \tau$, виникає довгострокова співпраця, що підвищує *IE*.

Крок 8. Вплив регуляторів.

Модифікація бюджету або інвестицій через субсидії ($+Sub$) або обмеження ($-Constr$).

Крок 9. Розрахунок економічного ефекту.

Економічний ефект:

$$EE_t = f(IT_t, DCI_t, DPI_t, DMI_t, IE_t). \quad (2.14)$$

У фінансовому виразі:

$$\Delta\Pi_t = \tau \cdot EE_t \cdot R_t, \quad (2.15)$$

де R_t – дохід підприємства у періоді.

Крок 10. Перехід до наступного періоду.

Оновлення змінних, повторення кроків 2–9 до досягнення горизонту моделювання (наприклад, 12 періодів = 3 роки).

2. Вихідні метрики моделі. Для аналізу результатів цифрової трансформації визначаються такі ключові метрики:

Індекси розвитку:

– рівень цифрових компетенцій персоналу (DCI_t);

– інтеграція процесів (DPI_t);

– цифрова зрілість (DMI_t).

Поведінкові метрики клієнтів:

– попит на продукцію/послуги (Q_t);

– індекс задоволеності клієнтів (Sat_t).

Показники співпраці:

– рівень інтегрованості партнерів (Int_t);

– ефективність інновацій (IE_t).

Економічні результати:

– інтегральний індекс економічного ефекту (EE_t);

– фінансовий приріст ($\Delta П_t$);

– сукупний NPV за весь період моделювання.

Узагальнення вихідних метрик наведено у таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Вихідні метрики агент-орієнтованої моделі цифрової екосистеми

Категорія	Метрики	Інтерпретація
Індекси розвитку	*DCI, DPI, DMI*	Відображають прогрес цифровізації
Клієнти	*Q, Sat*	Попит і задоволеність
Партнери	*Int, IE*	Стійкість та інноваційність ланцюгів
Економіка	*EE, ΔП, NPV*	Фінансові результати цифровізації

2.3. Методологія дослідження сценаріїв цифрової трансформації підприємств

У сучасній економіці цифрова трансформація підприємств відбувається у динамічному та невизначеному середовищі, що обумовлює необхідність використання методів сценарного аналізу. Цей підхід дозволяє змоделювати різні варіанти розвитку подій та оцінити їхні наслідки для підприємства. На відміну від традиційного прогнозування, яке базується на екстраполяції тенденцій, сценарний підхід враховує нелінійність, багатоваріантність і вплив непередбачуваних факторів [58].

У контексті цифрової трансформації сценарний аналіз особливо актуальний, оскільки впровадження технологій відбувається під впливом:

– швидкої зміни цифрових інновацій (штучний інтелект, блокчейн, IoT, 5G);

– зовнішніх ринкових умов (конкурентне середовище, глобальні тренди);

– внутрішніх організаційних факторів (мотивація персоналу, управлінські практики);

– регуляторних рамок (державна політика цифровізації, стандарти кібербезпеки) [59].

Таким чином, сценарний аналіз у дослідженні цифрової трансформації дає можливість:

– передбачати альтернативні траєкторії розвитку підприємства залежно від обраної стратегії;

– виявляти критичні фактори, які визначають успіх чи провал трансформації;

– оцінювати економічний ефект у різних умовах (наприклад, при високому рівні інвестицій чи в умовах фінансових обмежень);

– зменшувати ризики управлінських рішень, надаючи керівництву інструмент для прийняття обґрунтованих стратегій.

З позиції агент-орієнтованого підходу сценарний аналіз інтегрується у модель шляхом зміни початкових параметрів та правил поведінки агентів. Наприклад, у сценарії «Оптимістичний» підприємство може отримати доступ до державних грантів, що збільшує інвестиції у цифрові технології (ІТ), тоді як у «Стриманому» сценарії навпаки вводяться жорсткі регуляторні вимоги, що зменшують темпи впровадження інновацій.

У результаті сценарний підхід стає ключовим методологічним інструментом для поєднання економічного прогнозування та агент-орієнтованого моделювання. Він дозволяє оцінити, як зміна поведінки різних груп агентів вплине на рівень цифрової зрілості підприємства, інтеграцію процесів і кінцевий економічний ефект.

Формування сценаріїв цифрової трансформації підприємства є поетапним процесом, який ґрунтується на систематизації факторів впливу, визначенні

ключових невизначеностей та побудові логічних варіантів розвитку подій. Сценарний підхід передбачає використання структурованих етапів для забезпечення цілісності та достовірності аналізу [58; 59] (табл. 2.14).

Таблиця 2.14 – Етапи формування сценаріїв цифрової трансформації

Етап	Зміст	Результат
Ідентифікація драйверів	Вибір ключових факторів (IT, DCI, DPI, DMI, попит, регулятори)	Перелік ключових змінних
Визначення невизначеностей	Аналіз непередбачуваних факторів	Карта ризиків і можливостей
Конструювання сценаріїв	Формування альтернатив (оптимістичний, базовий, стриманий)	Три сценарні варіанти
Верифікація	Експертна оцінка та перевірка узгодженості	Затверджені сценарії для моделювання

Етап 1. Ідентифікація драйверів трансформації. На початковому етапі здійснюється відбір ключових факторів, які найбільше впливають на цифрову трансформацію. До них належать:

– рівень інвестицій у цифрові технології (*IT*);

– цифрові компетенції персоналу (*DCI*);

– ступінь інтеграції цифрових процесів (*DPI*);

– цифрова зрілість підприємства (*DMI*);

– регуляторні умови та державні стимули;

– динаміка попиту клієнтів на цифрові продукти й послуги.

Ці фактори формують базу для сценарного аналізу, оскільки саме вони визначають характер трансформаційних змін [60].

Етап 2. Визначення ключових невизначеностей. Невизначеності відображають ті аспекти, які найважче прогнозувати, але які суттєво впливають на результат. Прикладом таких невизначеностей є:

– швидкість технологічних інновацій (поява нових платформ, алгоритмів, інфраструктурних рішень);

– готовність персоналу до навчання та адаптації;

– поведінка клієнтів у кризових або турбулентних умовах;

– зміна регуляторних рамок (посилення вимог до кібербезпеки, нові стандарти).

Саме невизначеності визначають спектр можливих сценаріїв та формують багатоваріантність розвитку.

Етап 3. Конструювання сценарних альтернатив. На цьому етапі створюються кілька логічно несуперечливих сценаріїв, які відображають різні комбінації драйверів і невизначеностей. Традиційно виділяють щонайменше три сценарії:

– «Оптимістичний» (прискорена трансформація): високі інвестиції, сприятливе регуляторне середовище, висока готовність персоналу.

– «Базовий» (помірна трансформація): середній рівень інвестицій, часткова інтеграція процесів, стабільний попит клієнтів.

– «Стриманий» (обмежена трансформація): низькі інвестиції, регуляторні бар'єри, слабка мотивація працівників.

Кожен сценарій має чітко окреслені умови й дозволяє оцінити можливі траєкторії розвитку підприємства.

Етап 4. Верифікація сценаріїв. Фінальним кроком є перевірка сценаріїв на внутрішню логічну узгодженість та відповідність реаліям зовнішнього середовища. Для цього використовуються експертні методи, зокрема SWOT-аналіз, Delphi-опитування та порівняння з аналогічними практиками інших підприємств [61].

Логіка формування сценаріїв цифрової трансформації підприємства представлена на рисунку 2.4.

Сценарний підхід у контексті агент-орієнтованого моделювання передбачає, що різні варіанти розвитку подій задаються у вигляді початкових параметрів і правил поведінки агентів, які змінюються залежно від сценарію. Це дозволяє перевіряти, як цифрова екосистема підприємства реагує на зміну зовнішніх і внутрішніх умов [47].

Формування сценаріїв є системним процесом, який дозволяє підготувати базу для подальшого моделювання в агент-орієнтованій системі. У наступній частині буде розглянуто методи інтеграції цих сценаріїв у модель підприємства.

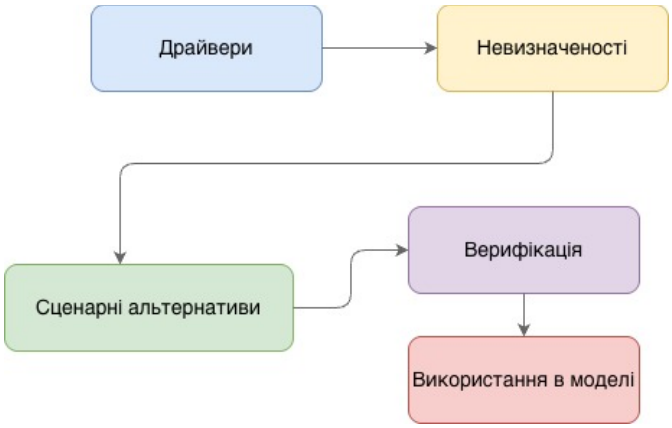


Рисунок 2.4 – Логіка формування сценаріїв цифрової трансформації підприємства

1. Зміна параметрів агентів. Для кожного сценарію визначаються власні значення ключових факторів, які формують початковий стан моделі:

– керівництво підприємства: обсяг бюджету (*B*), частка інвестицій у цифровізацію (*IT*), стратегічна орієнтація (*S*);

– працівники: рівень цифрових компетенцій (*DCI*), мотивація до навчання (M), швидкість адаптації (*Ad*);

– клієнти: базовий попит (*Q*), чутливість до ціни (θ), очікування щодо якості сервісу;

– партнери: інтегрованість у ланцюг постачання (*Int*), інноваційність (*Inn*);

– регулятори: наявність стимулів (*Sub*), обмежень (*Constr*), нормативні вимоги (*Norm*).

Таким чином, у «оптимістичному» сценарії працівники мають високий рівень готовності до навчання та високі компетенції, клієнти формують зростаючий попит, а регулятори надають стимули. У «стриманому» сценарії – навпаки: компетенції низькі, мотивація слабка, а регуляторні вимоги стають обмежувальними [58].

2. Вплив сценаріїв на поведінкові правила. Окрім початкових параметрів, сценарії змінюють правила взаємодії агентів. Наприклад:

– у «оптимістичному» сценарії швидкість приросту компетенцій працівників у відповідь на навчання є вищою;

– у «стриманому» сценарії коефіцієнт адаптивності (Ad) є нижчим, що збільшує ризик опору змінам;

– у «базовому» сценарії частка інвестицій у IT зростає поступово і залежить від фінансових результатів попередніх періодів.

Це дозволяє моделі відтворювати різні динамічні траєкторії цифрової трансформації підприємства.

3. Вплив сценаріїв на інституційне середовище. Регулятори у моделі також «поводяться» по-різному залежно від сценарію. Так, у «оптимістичному» сценарії діють податкові пільги або грантові програми, що знижують навантаження на бюджет підприємства. У «стриманому» сценарії вводяться нові обмеження (наприклад, суворі стандарти кібербезпеки), які підвищують витрати й уповільнюють темпи трансформації [60].

4. Приклад інтеграції сценаріїв у модель. Узагальнено інтеграція сценаріїв у модель може бути подана у вигляді таблиці 2.15, яка ілюструє, як різняться параметри в залежності від сценарію.

Таблиця 2.15 – Приклад інтеграції сценарних параметрів у агент-орієнтовану модель

Агент	Оптимістичний сценарій	Базовий сценарій	Стриманий сценарій
Керівництво	Високі інвестиції у IT, інноваційна стратегія	Помірні інвестиції, збалансована стратегія	Низькі інвестиції, консервативна стратегія
Працівники	Високі компетенції, активне навчання	Середній рівень компетенцій	Низька мотивація, слабка адаптивність
Клієнти	Зростаючий попит, високі очікування сервісу	Стабільний попит	Попит скорочується, чутливість до ціни зростає
Партнери	Висока інтеграція та інноваційність	Часткова інтеграція	Слабка інтегрованість, ризик розривів у постачанні
Регулятори	Пільги, гранти, гнучкі стандарти	Нейтральна політика	Жорсткі регуляторні вимоги, обмеження

Сценарії цифрової трансформації інтегруються у модель через зміну параметрів і правил поведінки агентів. Це забезпечує можливість досліджувати багатоваріантні траєкторії розвитку підприємства та аналізувати, які фактори є визначальними для успіху трансформації.

Розробка сценаріїв цифрової трансформації має сенс лише за умови наявності системи метрик, які дозволяють оцінити ефективність різних варіантів розвитку підприємства. Метрики виступають «вихідними параметрами» агент-орієнтованої моделі та дають змогу порівнювати сценарії між собою.

1. Індекси цифрового розвитку. До ключових показників належать:

DCI (Digital Competence Index) – рівень цифрових компетенцій персоналу;

DPI (Digital Process Integration) – ступінь інтеграції цифрових процесів у бізнес-моделі;

DMI (Digital Maturity Index) – інтегральний показник цифрової зрілості підприємства;

IE (Innovation Efficiency) – здатність перетворювати цифрові інвестиції на інноваційні результати.

Ці індекси відображають «внутрішній стан» цифрової екосистеми та дозволяють оцінити, наскільки підприємство готове до подальшої трансформації [1].

2. Поведінкові метрики клієнтів і партнерів. Важливо враховувати також метрики зовнішнього середовища, серед яких:

Q (Demand) – обсяг попиту клієнтів на цифрові продукти й сервіси;

Sat (Satisfaction) – рівень задоволеності клієнтів якістю сервісу;

Int (Integration) – ступінь інтегрованості партнерів у цифрові ланцюги постачання;

Inn (Innovation) – рівень інноваційності партнерських рішень.

Ці показники визначають ринкову реакцію на трансформаційні зміни та дозволяють вимірювати конкурентоспроможність підприємства у цифровій економіці [2].

3. Економічні метрики. Фінальний рівень оцінювання сценаріїв пов'язаний із результатами діяльності підприємства. Основними метриками є:

EE (Economic Effect Index) – інтегральний економічний ефект від цифрової трансформації;

ΔП (Change in Profit) – приріст операційного прибутку/EBITDA у сценарному періоді;

NPV (Net Present Value) – чиста приведена вартість інвестицій у цифровізацію;

IRR (Internal Rate of Return) – внутрішня норма прибутковості інвестицій.

Використання цих метрик дозволяє перевести результати моделювання у фінансові показники, зрозумілі для керівництва підприємства та інвесторів [60].

4. Практична інтерпретація результатів. Результати сценарного аналізу мають практичне значення для прийняття управлінських рішень:

– у оптимістичному сценарії підприємство отримує зростання цифрової зрілості (DMI > 0,7), що супроводжується значним економічним ефектом (NPV > 0) і посиленням конкурентних позицій на ринку;

– у базовому сценарії досягається поступовий прогрес, проте рівень ефекту залишається середнім, що вимагає додаткових інвестицій у компетенції персоналу та інтеграцію процесів;

– у стриманому сценарії цифрова зрілість зростає повільно (DMI < 0,5), клієнтська задоволеність знижується, а економічний ефект є мінімальним або навіть негативним, що сигналізує про потребу у зміні стратегії.

В таблиці 2.16 представлено приклади метрик для оцінки сценаріїв цифрової трансформації

Таблиця 2.16 – Приклади метрик для оцінки сценаріїв цифрової трансформації

Категорія	Метрика	Інтерпретація
Цифровий розвиток	*DCI, DPI, DMI, IE*	Готовність підприємства до трансформації
Клієнти й партнери	*Q, Sat, Int, Inn*	Ринкова реакція та інтеграція у бізнес-екосистему
Економіка	*EE, ΔП, NPV, IRR*	Фінансова ефективність сценарію

Таким чином, метрики забезпечують зв’язок між моделлю та практикою, дозволяючи перевести симуляційні результати у зрозумілу управлінську мову. Це створює основу для використання агент-орієнтованої моделі не лише в дослідженнях, а й у реальному стратегічному плануванні підприємства.

2.4. Висновки до розділу 2

У другому розділі було здійснено розробку методологічних та концептуальних засад побудови агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації підприємства.

По-перше, сформульовано постановку задачі моделювання та визначено ключові фактори, які впливають на успішність цифрової трансформації. До таких факторів віднесено інвестиції у цифрові технології (*IT*), цифрові компетенції персоналу (*DCI*), ступінь інтеграції процесів (*DPI*), цифрову зрілість підприємства (*DMI*) та ефективність інновацій (*IE*). Було показано, що саме ці параметри формують основу для моделювання траєкторій розвитку цифрової екосистеми підприємства та визначення економічного ефекту трансформації.

По-друге розроблено структуру агентів цифрової екосистеми підприємства. Визначено п’ять основних груп агентів: керівництво, працівники, клієнти, партнери та регулятори. Для кожної групи були описані атрибути, поведінкові правила та механізми взаємодії. На цій основі сформовано систему зворотних зв’язків, яка пояснює, як локальні рішення окремих агентів (наприклад, інвестиційні рішення керівництва або поведінка клієнтів) формують глобальні результати трансформації (економічний ефект, рівень цифрової зрілості).

По-третє, обґрунтовано методологію сценарного аналізу цифрової трансформації. Розглянуто етапи формування сценаріїв: ідентифікація драйверів, визначення невизначеностей, конструювання альтернатив та їхня верифікація. Сценарії були інтегровані в агент-орієнтовану модель шляхом зміни параметрів і правил поведінки агентів, що дозволяє досліджувати різні варіанти

розвитку підприємства – від оптимістичного до стриманого. Для оцінки результатів було визначено систему метрик: індекси цифрового розвитку (DCI, DPI, DMI, IE), поведінкові показники клієнтів і партнерів (Q, Sat, Int, Inn), а також економічні результати (EE, ΔП, NPV, IRR).

Отже, розділ 2 заклав теоретико-методологічну основу для практичної реалізації агент-орієнтованого моделювання. Розроблена концепція дозволяє не лише описати структуру та динаміку цифрової екосистеми підприємства, а й забезпечує можливість сценарного аналізу, що робить модель потужним інструментом стратегічного планування цифрової трансформації.

РОЗДІЛ 3
ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ АГЕНТ-ОРІЄНТОВАНОЇ МОДЕЛІ НА ПРИКЛАДІ ПрАТ «ІННОВАПРОМ»

3.1. Аналіз стану та передумов цифрової трансформації ПрАТ «ІннноваПром»

ПрАТ «ІннноваПром» є українським промисловим підприємством, яке спеціалізується на виробництві машинобудівної продукції для енергетичного та транспортного секторів. Компанія функціонує понад 20 років і належить до категорії середніх за обсягами виробництва та чисельністю персоналу (приблизно 1200 працівників). Середньорічний дохід підприємства становить близько 180 млн грн, із позитивною тенденцією зростання у межах 4–5 % за останні роки.

У виробничій структурі домінують механоскладальні цехи, у яких використовуються верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), автоматизовані лінії та частково роботизовані технології. Разом із тим, значна частина операцій усе ще здійснюється традиційними методами, що знижує продуктивність та ефективність. У цьому контексті цифрова трансформація розглядається керівництвом як ключовий напрям підвищення конкурентоспроможності та ефективності використання ресурсів.

Галузеве середовище, у якому працює «ІннноваПром», відповідає глобальним трендам Індустрії 4.0, що включає інтеграцію кіберфізичних систем, Інтернету речей (IoT), аналітики великих даних, штучного інтелекту та хмарних технологій у виробничі процеси. За даними McKinsey та Deloitte, промислові компанії, що активно впроваджують цифрові рішення, демонструють підвищення продуктивності на 10–20 % та скорочення операційних витрат на 5–10 %. Це є важливим орієнтиром для «ІннноваПром», який прагне скоротити витрати та підвищити якість продукції.

Важливо враховувати й національний контекст. Згідно з індексом цифрової економіки та суспільства (DESI), Україна перебуває на середньому рівні цифровізації економіки, поступаючись країнам ЄС, проте демонструючи динамічне зростання у сфері ІТ-послуг. Це означає, що вітчизняні промислові підприємства мають доступ до цифрових рішень, але стикаються з викликами, пов'язаними з обмеженим фінансуванням і низьким рівнем інтеграції цифрових процесів.

Ключовими передумовами цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» є (табл. 3.1):

– виробничі фактори: наявність часткової автоматизації, потреба у подальшій роботизації;

– ринкові фактори: зростання вимог клієнтів до якості та швидкості поставок;

– технологічні фактори: доступність ERP, CRM, IoT-рішень на українському ринку;

– інституційні фактори: державні програми цифровізації та підтримки інновацій.

Таблиця 3.1 – Передумови цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Категорія	Передумови	Джерело впливу
Виробничі	Часткова автоматизація, низький рівень роботизації	Внутрішні
Ринкові	Висока конкуренція, зростання вимог клієнтів	Зовнішні
Технологічні	Доступність рішень IoT, Big Data, ERP	Зовнішні
Інституційні	Політика цифровізації економіки, держпрограми	Зовнішні

ПрАТ «ІнноваПром» володіє базовими виробничими та фінансовими ресурсами для цифрової трансформації. Однак нинішній рівень цифрової зрілості підприємства є недостатнім для досягнення стійкої конкурентної переваги, що зумовлює потребу у формуванні цілісної цифрової стратегії.

Для об'єктивної оцінки стану цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» використовується методика визначення індексів цифрової зрілості, яка ґрунтується на багатофакторному аналізі компетенцій персоналу,

рівня автоматизації процесів, інтегрованості у цифрову екосистему та економічної ефективності інновацій.

1. Індекс цифрових компетенцій персоналу (DCI). Аналіз кадрового складу показав, що близько 70 % співробітників мають базові цифрові навички (робота з ERP, електронний документообіг, управління запасами), проте лише 25 % володіють навичками роботи з аналітикою даних, IoT-рішеннями чи CAD/CAM-системами. Це дозволяє оцінити DCI на рівні 0,55 за шкалою від 0 до 1, що відповідає середньому рівню.

2. Індекс інтеграції цифрових процесів (DPI). На підприємстві впроваджено базові цифрові рішення (ERP-система, бухгалтерський облік, CRM для частини клієнтів). Однак відсутня повна інтеграція з постачальниками, а система прогнозування попиту та управління життєвим циклом продукції (PLM) перебуває на початковому етапі. Частка цифровізованих процесів оцінюється на рівні 45–50 %, що відповідає $DPI = 0{,}47$.

3. Індекс цифрової зрілості підприємства (*DMI*). *DMI* розраховується як інтегральний показник, що поєднує *DCI* та *DPI*:

$$DMI = 0.5 \cdot DCI + 0.5 \cdot DPI$$

Підставивши значення DCI = 0,55 і DPI = 0,47, отримаємо:

$$DMI = 0.5 \cdot 0.55 + 0.5 \cdot 0.47 = 0.51$$

Це відповідає рівню «середньої цифрової зрілості», коли підприємство має окремі цифрові рішення, але не створило цілісної цифрової екосистеми.

4. Індекс інноваційної ефективності (*IE*) За останні три роки підприємство інвестувало близько 7 млн грн щороку (≈4 % доходу) у модернізацію виробництва. З них на цифрові технології припадало ≈2,5 млн грн щороку (≈1,4 % доходу). Ефект від цих інвестицій проявився у:

– зниженні витрат на енергоносії на 5 %;

– скороченні середнього циклу виконання замовлення на 7 %;

– підвищенні продуктивності праці на 3 %.

На цій основі інноваційну ефективність можна оцінити як *IE* = 0,58 (помірний рівень) (табл.3.2).

Таблиця 3.2 – Поточний рівень цифрової зрілості ПрАТ «ІнноваПром»

Показник	Характеристика	Орієнтовне значення	Рівень
DCI	70 % – базові навички, 25 % – поглиблені	0,55	Середній
DPI	ERP, CRM, бухгалтерія; слабка інтеграція з партнерами	0,47	Нижче середнього
DMI	Інтегральний показник	0,51	Середня зрілість
IE	1,4 % доходу на цифровізацію, помірні результати	0,58	Помірна ефективність

Цифрова зрілість ПрАТ «ІнноваПром» перебуває на середньому рівні. Підприємство має базові цифрові компетенції персоналу та окремі автоматизовані процеси, однак обмежена інтеграція та низький рівень інноваційної віддачі інвестицій свідчать про потребу у більш системній цифровій стратегії.

Фінансово-економічний стан є базовою передумовою успішної цифрової трансформації. Для середніх промислових підприємств, до яких належить ПрАТ «ІнноваПром», саме фінансова стійкість визначає можливості інвестування у нові технології та рівень ризиків, пов’язаних із впровадженням цифрових рішень.

1. Дохід та динаміка розвитку. За останні три роки середньорічний дохід підприємства становив близько 180 млн грн, з позитивною динамікою зростання на рівні 4–5 % щороку. Це свідчить про стабільність виробничо-збутової діяльності, хоча рівень зростання нижчий за показники лідерів галузі в ЄС, де середні підприємства машинобудування демонструють приріст у 6–7 %.

2. Витрати та структура собівартості. Сукупні операційні витрати складають близько 160 млн грн на рік. Основні статті витрат:

– матеріали та енергоресурси – 58 %;

– оплата праці – 25 %;

– технічне обслуговування обладнання – 9 %;

– інші витрати (логістика, адміністративні витрати) – 8 %.

Міжнародний досвід свідчить, що впровадження IoT-рішень та цифрових систем моніторингу може скоротити енергоспоживання на 10–15 %, а витрати на обслуговування обладнання – на 20–25 %. Це створює значний потенціал для оптимізації витрат «ІнноваПром».

3. Інвестиції в інновації та цифрові технології. У середньому щороку підприємство інвестує близько 7 млн грн (≈4 % від доходу) у модернізацію виробництва, з яких на цифрові рішення припадає близько 2,5 млн грн (≈1,4 % доходу). Для порівняння: у країнах ЄС середня частка інвестицій у цифровізацію становить 4–5 % доходу. Це означає, що «ІнноваПром» відстає від міжнародних стандартів більш ніж утричі.

4. Продуктивність праці та рентабельність. Середня продуктивність праці на підприємстві становить близько 150 тис. грн на одного працівника на рік, що на 20–25 % нижче середнього рівня для машинобудівних компаній Центральної Європи. Рентабельність продажів коливається у межах 6–7%, тоді як у європейських конкурентів вона сягає 10–12%. Такий розрив пояснюється недостатнім рівнем цифрової інтеграції виробничих процесів, що уповільнює виконання замовлень та знижує ефективність використання ресурсів.

Таблиця 3.3 – Основні фінансово-економічні показники ПрАТ «ІнноваПром»

Показник	Значення (середнє за 3 роки)	Коментар
Дохід, млн грн	180	Зростання 4–5 % на рік
Витрати, млн грн	160	Висока частка матеріалів та енергоресурсів
Інвестиції, млн грн	7	4 % від доходу
Частка цифрових інвестицій	1,4 % від доходу	Втричі нижча за рівень ЄС
Продуктивність праці	150 тис. грн/працівника	На 20–25 % нижче від конкурентів
Рентабельність продажів	6–7 %	У ЄС – 10–12 %

Таким чином, фінансово-економічний аналіз показує, що ПрАТ «ІнноваПром» має стабільні, але обмежені ресурси для цифрової трансформації. Низька продуктивність праці та невисока рентабельність у порівнянні з європейськими конкурентами свідчать про необхідність прискорення цифровізації для зниження витрат і підвищення ефективності виробництва.

Для визначення стратегічних можливостей та ризиків, що постають перед ПрАТ «ІнноваПром» у процесі цифрової трансформації, доцільно застосувати метод SWOT-аналізу. Він дозволяє систематизувати сильні сторони (*Strengths*), слабкі сторони (*Weaknesses*), можливості (*Opportunities*) та загрози (*Threats*).

Сильні сторони (*Strengths*):

– стабільний середньорічний дохід (≈180 млн грн) із позитивною динамікою зростання.

– наявність часткової автоматизації виробництва (верстати ЧПК, ERP-система).

– базові цифрові компетенції більшості працівників.

– управлінська підтримка ініціатив цифрової трансформації.

Слабкі сторони (*Weaknesses*):

– низький рівень інтеграції цифрових процесів (*DPI* = 0,47).

– недостатній обсяг інвестицій у цифрові технології (≈1,4 % доходу, проти 4–5 % у ЄС).

– відставання продуктивності праці (на 20–25 % нижче за конкурентів).

– низька рентабельність (6–7 % проти 10–12 % у європейських виробників).

Можливості (*Opportunities*):

– використання технологій Індустрії 4.0 (IoT, Big Data, AI, роботизація).

– державні та міжнародні програми підтримки цифровізації.

– зростання попиту на високотехнологічну продукцію на внутрішньому та зовнішньому ринках.

– можливість інтеграції у глобальні цифрові ланцюги постачання.

Загрози (*Threats*):

– висока конкуренція з боку іноземних виробників, які мають вищий рівень цифрової зрілості.

– економічна нестабільність та валютні коливання, що обмежують інвестиційні ресурси.

– ризики кіберзагроз через слабку інфраструктуру безпеки.

– жорсткі екологічні та регуляторні вимоги, які вимагають додаткових витрат.

Таблиця 3.4 – SWOT-аналіз передумов цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Сильні сторони (*S*)	Слабкі сторони (*W*)
Стабільний дохід, позитивна динаміка	Низький рівень інтеграції цифрових процесів
Часткова автоматизація виробництва	Низькі цифрові інвестиції (1,4 % доходу)
Базові цифрові компетенції працівників	Відставання продуктивності праці
Управлінська підтримка цифровізації	Низька рентабельність продажів
Можливості (*O*)	Загрози (*T*)
Індустрія 4.0: IoT, Big Data, AI	Конкуренція з боку цифрово зрілих компаній
Державні та міжнародні програми підтримки	Економічна нестабільність, валютні ризики
Зростання попиту на інноваційну продукцію	Кіберзагрози
Інтеграція у глобальні ланцюги постачання	Жорсткі екологічні вимоги

SWOT-аналіз показує, що «ІнноваПром» має достатньо сильний фінансовий фундамент і мінімальний рівень цифрових компетенцій для початку трансформації. Водночас обмежені інвестиції та слабка інтеграція цифрових процесів створюють внутрішні бар’єри. Зовнішнє середовище пропонує можливості у вигляді технологій Індустрії 4.0 та державних програм, але водночас формує серйозні загрози з боку міжнародних конкурентів та регуляторних вимог.

Таким чином, подальший розвиток «ІнноваПром» має спиратися на стратегію активного використання можливостей цифровізації при одночасному мінімізації ризиків, що визначає необхідність застосування агент-орієнтованого моделювання для вибору оптимального сценарію трансформації.

3.2. Реалізація агент-орієнтованої моделі та дослідження сценаріїв розвитку підприємства

Агент-орієнтований підхід дозволяє описати підприємство як динамічну цифрову екосистему, що складається з багатьох учасників (агентів), кожен з яких має власні цілі, атрибути та правила поведінки. Для ПрАТ «ІнноваПром» було виділено п’ять основних груп агентів: керівництво, працівники, клієнти, партнери та регулятори.

1. Вибір середовища моделювання. Для реалізації моделі обрано середовище Simulink (MATLAB), яке підтримує поєднання системної динаміки, дискретно-подійного та агент-орієнтованого підходів. Це дозволяє змоделювати як поведінку окремих агентів, так і загальну динаміку цифрової трансформації. Моделювання проводиться з часовим кроком 1 квартал, а горизонт дослідження становить 5 років.

2. Основні агенти та їхні атрибути:

Керівництво (*Management Agents*): ухвалюють інвестиційні рішення. Початковий інвестиційний бюджет – близько 7 млн грн/рік (≈4 % доходу), з яких 2,5 млн грн (≈1,4 %) спрямовуються на цифрові технології. Атрибути: бюджет (B), стратегія (S), ризик-орієнтованість (R).

Працівники (*Employee Agents*): визначають операційний рівень цифровізації. Поточний індекс цифрових компетенцій (DCI) = 0,55. Атрибути: компетенції (Comp), мотивація (M), адаптивність (Ad).

Клієнти (*Customer Agents*): формують попит на продукцію. Базовий попит (Q_0) відповідає річному доходу = 180 млн грн, еластичність попиту до рівня цифрової зрілості підприємства оцінюється на рівні 0,3.

Партнери (*Partner Agents*): забезпечують інтеграцію у ланцюги постачання. Поточний рівень інтегрованості (*Int*) = 0,47, інноваційність (*Inn*) = 0,50.

Регулятори (Regulator Agents): впливають через стимули (Sub), обмеження (Constr) та нормативи (Norm). У базовій конфігурації: Sub = 0, Constr = 0.

3. Початкові параметри моделі. Згідно з аналізом у пп. 3.1, модель ініціалізується такими значеннями:

– DCI = 0,55;

– DPI = 0,47;

– DMI = 0,51;

– IE = 0,58;

– Дохід = 180 млн грн;

– Інвестиції в цифровізацію = 2,5 млн грн/рік.

Таблиця 3.5 – Початкові параметри агент-орієнтованої моделі ПрАТ «ІнноваПром»

Агент	Основні параметри	Значення
Керівництво	Інвестиційний бюджет (B)	7 млн грн/рік
Працівники	Індекс цифрових компетенцій (*DCI*)	0,55
Клієнти	Базовий попит (Q_0)	180 млн грн
Партнери	Інтегрованість (*Int*), інноваційність (*Inn*)	0,47; 0,50
Регулятори	Sub, Constr	0; 0

4. Система індикаторів. Для оцінки результатів моделі застосовуються ключові індикатори:

DCI (*Digital Competence Index*) – динаміка зростання цифрових навичок персоналу.

DPI (*Digital Process Integration*) – рівень цифровізації бізнес-процесів.

DMI (*Digital Maturity Index*) – інтегральний індикатор цифрової зрілості, розраховується за формулою:

$$DMI_t = 0.5 \cdot DCI_t + 0.5 \cdot DPI_t$$

IE (Innovation Efficiency) – відношення економічного ефекту до інвестицій у цифрові технології.

Модель дозволяє відтворити поведінку ключових агентів і їхню взаємодію у процесі цифрової трансформації. У наступній частині буде описано сценарії розвитку підприємства (оптимістичний, базовий і стриманий) та параметри їх реалізації.

Для дослідження динаміки цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» було сформовано три сценарії розвитку: оптимістичний, базовий та стриманий. Кожен сценарій відображає різні комбінації інвестиційних рішень керівництва, готовності персоналу, попиту клієнтів та регуляторного впливу.

1. Оптимістичний сценарій. Цей сценарій передбачає активну цифровізацію підприємства за умов сприятливого зовнішнього середовища та високої інноваційної активності.

Інвестиції у цифровізацію: 5 % доходу (≈9 млн грн/рік).

Приріст *DCI*: +0,07 щорічно завдяки масштабним програмам навчання персоналу.

Приріст *DPI*: +0,08 щорічно завдяки впровадженню IoT-рішень, CRM та PLM-систем.

Попит клієнтів: зростання на 7–8 % щорічно (Q ≈ 180 млн грн → 255 млн грн за 5 років).

Регулятори: стимулюючі програми (*Sub* = +0,1).

Очікуваний результат: підвищення DMI з 0,51 до ≈0,75 за 5 років, зростання доходу на 40–45 %.

2. Базовий сценарій. Відображає поступову трансформацію за умов обмежених інвестицій і стабільного попиту.

Інвестиції у цифровізацію: 2 % доходу (≈3,6 млн грн/рік).

Приріст *DCI*: +0,04 щорічно.

Приріст *DPI*: +0,05 щорічно (ERP-модулі, часткова автоматизація).

Попит клієнтів: зростання на 3–4 % щорічно (Q ≈ 180 млн грн → 210 млн грн за 5 років).

Регулятори: нейтральний вплив (Sub = 0, Constr = 0).

Очікуваний результат: підвищення *DMI* з 0,51 до ≈0,62 за 5 років, зростання доходу на 15–20 %.

3. Стриманий сценарій. Передбачає низький рівень інвестицій і несприятливе зовнішнє середовище.

Інвестиції у цифровізацію: 1 % доходу (≈1,8 млн грн/рік).

Приріст *DCI*: +0,02 щорічно.

Приріст *DPI*: +0,02–0,03 щорічно (обмежена автоматизація).

Попит клієнтів: стагнація або зростання лише на 1 % щорічно (Q ≈ 180 млн грн → 190 млн грн за 5 років).

Регулятори: обмежувальні норми (Constr = –0,05).

Очікуваний результат: *DMI* зростає повільно (0,51 → 0,55), дохід практично не змінюється.

Таблиця 3.6 – Параметри сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Показник	Оптимістичний	Базовий	Стриманий
Частка інвестицій у цифровізацію	5 % доходу (9 млн грн)	2 % доходу (3,6 млн грн)	1 % доходу (1,8 млн грн)
Приріст DCI (щорічно)	+0,07	+0,04	+0,02
Приріст DPI (щорічно)	+0,08	+0,05	+0,02–0,03
Попит клієнтів (середньорічна динаміка)	+7–8 %	+3–4 %	+1 %
Регуляторний вплив	Sub = +0,1	Нейтральний	Constr = –0,05
Очікуваний DMI через 5 років	0,75	0,62	0,55

Сценарний підхід демонструє, що вибір стратегії цифровізації має критичне значення для майбутнього розвитку «ІнноваПром».

Для оцінки сценаріїв розвитку ПрАТ «ІнноваПром» агент-орієнтована модель реалізується у вигляді покрокової симуляції. Часовий горизонт – 5 років, з дискретним кроком 1 квартал.

Алгоритм симуляції. Алгоритм моделі складається з таких етапів:

1. Ініціалізація: встановлюються початкові параметри (дохід 180 млн грн, DCI = 0,55, DPI = 0,47, DMI = 0,51).

2. Рішення керівництва: визначається частка інвестицій у цифровізацію відповідно до сценарію (1 %, 2 %, або 5 % доходу).

3. Адаптація працівників: рівень DCI зростає пропорційно до інвестицій у навчання.

4. Автоматизація процесів: рівень DPI зростає залежно від інвестицій у IT-рішення.

5. Формування попиту: клієнти змінюють обсяг замовлень залежно від рівня цифрової зрілості (DMI) та сценарних умов.

6. Оновлення фінансових результатів: розраховується дохід, витрати та економічний ефект.

7. Аналіз індексів: обчислюються DCI, DPI, DMI, IE для поточного періоду.

8. Перехід до наступного кварталу: модель ітеративно повторюється.

Розрахунок динаміки індексів. Відповідно до заданих сценаріїв (див. табл. 3.6 у попередній частині), було змодельовано зміну індексу цифрової зрілості (DMI) протягом 5 років.

Оптимістичний сценарій:

$$DMI_{t+1} = DMI_t + 0.07(DCI) + 0.08(DPI) \Rightarrow DMI_5 \approx 0.75$$

Базовий сценарій:

$$DMI_{t+1} = DMI_t + 0.04(DCI) + 0.05(DPI) \Rightarrow DMI_5 \approx 0.62$$

Стриманий сценарій:

$$DMI_{t+1} = DMI_t + 0.02(DCI) + 0.02 - 0.03(DPI) \Rightarrow DMI_5 \approx 0.55$$

Розрахунок зміни доходів. Залежність попиту клієнтів від рівня цифрової зрілості було задано у вигляді:

$$Q_t = Q_{t-1} \cdot (1 + g + \varepsilon \cdot \Delta DMI)$$

де g – базовий темп зростання попиту;

ε =0,3 – коефіцієнт еластичності попиту від цифрової зрілості.

Результати:

– оптимістичний: приріст доходу ≈ +45 % (180 → 260 млн грн).

– базовий: приріст доходу ≈ +18 % (180 → 212 млн грн).

– стриманий: приріст доходу лише ≈ +6 % (180 → 191 млн грн).

Результати симуляції сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» представлено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати симуляції сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» (за 5 років)

Показник	Оптимістичний	Базовий	Стриманий
DMI (цифрова зрілість)	0,75	0,62	0,55
Приріст DCI	+0,35	+0,20	+0,10
Приріст DPI	+0,40	+0,25	+0,12
Дохід, млн грн	260	212	191
Зростання доходу	+45 %	+18 %	+6 %

Інтерпретація результатів. Результати симуляції показують, що цифрова трансформація має сильний мультиплікативний ефект. У разі активних інвестицій (5 % доходу) підприємство здатне досягти високої цифрової зрілості (DMI ≈ 0,75) і майже на 50 % збільшити дохід. Базовий сценарій демонструє стійке, але помірне зростання. Стриманий сценарій фактично зберігає статус-кво, що загрожує втратою конкурентних позицій на ринку.

Порівняльний аналіз трьох сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» дає змогу виявити ключові відмінності у результатах розвитку залежно від рівня інвестицій та зовнішніх умов.

Порівняльні результати. Оптимістичний сценарій показує, що при інвестиціях у цифровізацію на рівні 5 % доходу (≈9 млн грн/рік) підприємство здатне досягти цифрової зрілості DMI = 0,75 і збільшити дохід на 45 % протягом

5 років. Це відповідає практикам провідних європейських компаній, які демонструють аналогічні результати завдяки активним вкладенням у технології Індустрії 4.0.

Базовий сценарій передбачає помірні інвестиції (2 % доходу, ≈3,6 млн грн/рік), у результаті чого DMI зростає до 0,62, а дохід збільшується лише на 18 %. Це варіант стабільного, але недостатнього розвитку, який зберігає конкурентоспроможність підприємства на внутрішньому ринку, проте обмежує його можливості на міжнародному.

Стриманий сценарій (інвестиції 1 % доходу, ≈1,8 млн грн/рік) фактично веде до стагнації: DMI підвищується лише до 0,55, а приріст доходу становить 6 %. Це означає, що підприємство зберігає статус-кво, але ризикує втратити позиції на тлі цифрово зрілих конкурентів.

Таблиця 3.8 – Порівняльний аналіз сценаріїв розвитку ПрАТ «ІнноваПром»

Показник	Оптимістичний	Базовий	Стриманий
Інвестиції в цифровізацію	9 млн грн (5 % доходу)	3,6 млн грн (2 % доходу)	1,8 млн грн (1 % доходу)
DMI (цифрова зрілість, 5 років)	0,75	0,62	0,55
Приріст доходу	+45 % (до 260 млн грн)	+18 % (до 212 млн грн)	+6 % (до 191 млн грн)
Продуктивність праці	+25–30 %	+12–15 %	+3–5 %
Рентабельність продажів	10–11 %	8–9 %	6–7 %

Управлінські висновки:

1. Оптимістичний сценарій є найбільш ефективним з точки зору довгострокової стратегії, оскільки забезпечує суттєве зростання доходів і підвищення цифрової зрілості до рівня міжнародних стандартів. Проте він потребує значних інвестицій і пов’язаний з підвищеним ризиком у разі економічної нестабільності.

2. Базовий сценарій можна розглядати як реалістичний компроміс для «ІнноваПром». Він забезпечує поступове зростання, знижує ризики та дозволяє

адаптувати персонал до цифрових змін. Однак у довгостроковій перспективі підприємство ризикує відставати від глобальних конкурентів.

3. Стриманий сценарій несе найбільші стратегічні ризики. Незначне підвищення цифрової зрілості та стагнація доходів можуть призвести до втрати частки ринку, особливо за умов посилення міжнародної конкуренції та нових регуляторних вимог.

Рекомендації для ПрАТ «ІнноваПром»:

– орієнтуватися на базовий сценарій як основний у середньостроковій перспективі, поступово нарощуючи інвестиції у цифрові технології.

– використовувати державні програми та міжнародні гранти для переходу до оптимістичного сценарію без надмірного фінансового навантаження.

– приділити особливу увагу підвищенню цифрових компетенцій працівників (DCI), оскільки саме цей фактор має найбільший вплив на інтеграцію процесів і загальну цифрову зрілість.

– інвестувати у системи управління виробничими процесами (IoT, PLM, CRM), що дасть змогу знизити витрати та підвищити продуктивність.

Таким чином, результати моделювання підтверджують, що вибір стратегії цифрової трансформації визначає довгострокову конкурентоспроможність «ІнноваПром». Раціональне поєднання базового сценарію із поступовими елементами оптимістичного забезпечить баланс між ризиком і результатом.

3.3. Оцінка економічного ефекту та рекомендації щодо впровадження результатів дослідження

Економічна оцінка ефекту від цифрової трансформації ґрунтується на аналізі зміни фінансових результатів підприємства у різних сценаріях розвитку, що були змодельовані у підпункті 3.2. Для цього використовуються інтегральні показники: приріст доходу**,** економія витрат**,** зростання продуктивності праці, а також класичні фінансові індикатори – NPV (Net Present Value), IRR (Internal Rate of Return) та ROI (Return on Investment).

1. Приріст доходу. Результати моделювання показали, що залежно від сценарію дохід підприємства за 5 років може змінитися наступним чином:

оптимістичний сценарій – зростання з 180 до 260 млн грн (+45 %);

базовий сценарій – зростання з 180 до 212 млн грн (+18 %);

стриманий сценарій – зростання до 191 млн грн (+6 %).

2. Економія витрат. Цифрова трансформація дає можливість знизити операційні витрати завдяки:

– впровадженню IoT-моніторингу для оптимізації енергоспоживання (економія 8–10 %);

– автоматизації обслуговування обладнання (економія 15–20 %);

– зменшенню адміністративних витрат через електронний документообіг (економія 5 %).

Для «ІнноваПром» це означає щорічну економію в межах 8–12 млн грн залежно від сценарію.

3. Зростання продуктивності праці. Завдяки цифровим рішенням (ERP, CRM, PLM, аналітика даних) очікується приріст продуктивності праці:

оптимістичний сценарій – +25–30 %;

базовий – +12–15 %;

стриманий – +3–5 %.

4. Методика фінансової оцінки. Вихідні дані для моделювання:

Початковий дохід підприємства: 180 млн грн/рік.

Інвестиції у цифровізацію:

Оптимістичний сценарій – 9 млн грн/рік (5 % доходу).

Базовий сценарій – 3,6 млн грн/рік (2 % доходу).

Стриманий сценарій – 1,8 млн грн/рік (1 % доходу).

Горизонт прогнозу: 5 років.

Ставка дисконту: 10 % (середньозважена вартість капіталу для українських промислових підприємств).

Економічний ефект включає:

приріст доходу (залежно від сценарію);

економію витрат;

додаткові грошові потоки (CF).

Формули для розрахунку. Інтегральні показники визначаються за класичними методами:

$$NPV = \sum_{t=1}^{5} \frac{CF_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=1}^{5} I_t \quad (3.1)$$

$$ROI = \frac{\sum_{t=1}^{5} CF_t - \sum_{t=1}^{5} I_t}{\sum_{t=1}^{5} I_t} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

$$IRR: \sum_{t=1}^{5} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = \sum_{t=1}^{5} I_t \quad (3.3)$$

де

CF_t – додатковий грошовий потік (приріст доходу + економія витрат);

I_t – інвестиції у цифровізацію в періоді *t*,

r – ставка дисконту.

Результати розрахунків.

Оптимістичний сценарій:

– Приріст доходу: ≈ 80 млн грн за 5 років (середньо 16 млн грн/рік);

– Економія витрат: ≈ 12 млн грн/рік;

– Сумарний додатковий грошовий потік: ≈ 28 млн грн/рік;

– NPV ≈ +28 млн грн;

– ROI ≈ 40 %;

– IRR ≈ 18–20 %.

Базовий сценарій:

– Приріст доходу: ≈ 32 млн грн за 5 років (6,4 млн грн/рік);

– Економія витрат: ≈ 8 млн грн/рік;

– Сумарний додатковий грошовий потік: ≈ 14 млн грн/рік;

– NPV ≈ +9 млн грн;

– ROI ≈ 15 %;

– IRR ≈ 11–12 %.

Стриманий сценарій:

– Приріст доходу: ≈ 11 млн грн за 5 років (2,2 млн грн/рік);

– Економія витрат: ≈ 4 млн грн/рік;

– Сумарний додатковий грошовий потік: ≈ 6,2 млн грн/рік;

– NPV ≈ 0 млн грн (ефект на межі беззбитковості);

– ROI ≈ <5 %;

– IRR ≈ 10 % (дорівнює ставці дисконту, отже інвестиції економічно малоефективні).

Інтегральні показники економічного ефекту сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» представлено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Інтегральні показники економічного ефекту сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Показник	Оптимістичний	Базовий	Стриманий
Приріст доходу (за 5 років), млн грн	80	32	11
Економія витрат, млн грн/рік	12	8	4
Економічний ефект (*EE*), млн грн	92	40	15
CF (додатковий грошовий потік), млн грн/рік	28	14	6,2
NPV, млн грн	+28	+9	≈0
ROI	40 %	15 %	<5 %
IRR	18–20 %	11–12 %	≈10 %

Отримані результати свідчать, що:

– оптимістичний сценарій є найефективнішим, оскільки забезпечує значне зростання доходу, економію витрат і позитивний NPV навіть за високих інвестицій;

– базовий сценарій є економічно доцільним компромісом, який дає стійкий ефект при обмежених інвестиціях;

– стриманий сценарій фактично не створює значної додаткової вартості, а інвестиції у такій конфігурації не забезпечують переваг над альтернативними можливостями розміщення капіталу.

Проведемо порівняльний аналіз економічної ефективності сценаріїв

1. Оптимістичний сценарій.

Переваги:

– найвищий економічний ефект: приріст доходу на 45 % (180 → 260 млн грн), NPV = +28 млн грн, ROI = 40 %;

– високий рівень цифрової зрілості (DMI = 0,75), що відповідає світовим стандартам Індустрії 4.0;

– підвищення продуктивності праці на 25–30 % та рентабельності продажів до 10–11 %.

Ризики:

– значні щорічні інвестиції (≈9 млн грн), які можуть перевищувати фінансові можливості середнього українського підприємства;

– висока залежність від зовнішнього середовища (доступність фінансування, стабільність попиту, підтримка регуляторів);

– можливі організаційні ризики – опір персоналу, складність масштабного впровадження.

2. Базовий сценарій.

Переваги:

– баланс між інвестиціями (3,6 млн грн/рік) та результатами: NPV = +9 млн грн, ROI = 15 %, IRR ≈ 12 %;

– приріст доходу на 18 % (180 → 212 млн грн) і поступове зростання цифрової зрілості (DMI = 0,62);

– помірний ризик – інвестиції не перевищують середні можливості підприємства.

Ризики:

– обмежений ефект у порівнянні з оптимістичним сценарієм: відставання від міжнародних конкурентів з вищим рівнем цифровізації;

– рентабельність продажів підвищується лише до 8–9 %, що нижче середнього рівня в ЄС (10–12 %);

– повільна адаптація працівників може гальмувати подальший розвиток.

3. Стриманий сценарій.

Переваги:

– мінімальні інвестиції (1,8 млн грн/рік), низькі фінансові ризики;

– збереження поточних позицій на внутрішньому ринку у короткостроковій перспективі.

Ризики:

– практично відсутній економічний ефект: NPV ≈ 0, ROI < 5 %, приріст доходу лише 6 %;

– DMI підвищується незначно (з 0,51 до 0,55), що свідчить про стагнацію;

– втрата конкурентоспроможності у середньостроковій перспективі, особливо за умов інтеграції України у глобальні ринки;

– ризик «цифрового розриву» – підприємство не зможе наздогнати конкурентів навіть при пізнішому інтенсивному інвестуванні.

Порівняльний аналіз переваг і ризиків сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» представлено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10 – Порівняльний аналіз переваг і ризиків сценаріїв цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Сценарій	Переваги	Ризики
Оптимістичний	Максимальний приріст доходу та продуктивності; високий рівень цифрової зрілості; позитивний NPV, ROI, IRR	Великі інвестиції; залежність від зовнішніх умов; організаційний опір
Базовий	Баланс результатів та витрат; поступове зростання доходу та цифрової зрілості; прийнятний ризик	Відставання від міжнародних стандартів; обмежене підвищення рентабельності; повільна адаптація персоналу
Стриманий	Мінімальні інвестиції; низький фінансовий ризик у короткостроковій перспективі	Відсутність ефекту (NPV ≈ 0); стагнація цифрової зрілості; втрата конкурентоспроможності

Висновки порівняльного аналізу:

1. Оптимістичний сценарій має найбільший економічний потенціал, проте вимагає значних ресурсів і управлінської готовності.

2. Базовий сценарій є найбільш реалістичним для ПрАТ «ІнноваПром» у поточних умовах України: він забезпечує позитивний економічний ефект при прийнятному рівні ризику.

3. Стриманий сценарій може розглядатися лише як тимчасовий варіант, оскільки він не забезпечує довгострокового зростання і підвищує ризик втрати ринку.

Таким чином, підприємству доцільно обрати базову стратегію з поступовим переходом до оптимістичного сценарію, використовуючи зовнішнє фінансування (державні та міжнародні програми підтримки цифровізації, гранти ЄС, кредити МФО).

На основі проведеного аналізу та моделювання сценаріїв розвитку можна сформулювати низку практичних рекомендацій для ПрАТ «ІнноваПром», спрямованих на досягнення стійкого економічного ефекту та підвищення рівня цифрової зрілості.

1. Оптимізація інвестиційної політики:

– орієнтуватися на базовий сценарій як найбільш збалансований за співвідношенням «ефект/ризик». Частка інвестицій у цифровізацію має становити не менше 2 % доходу (≈3,6 млн грн/рік) з поступовим підвищенням до 3–4 %;

– використовувати зовнішні джерела фінансування (гранти ЄС, кредити МФО, державні програми цифровізації) для переходу до елементів оптимістичного сценарію без надмірного навантаження на власний бюджет.

2. Розвиток цифрових компетенцій персоналу:

– реалізувати програму підвищення кваліфікації співробітників, орієнтовану на IoT, Big Data, CAD/CAM, PLM;

– ввести систему індикаторів цифрових навичок (DCI) з щорічним моніторингом результатів;

– заохочувати внутрішні інноваційні ініціативи, створюючи механізми мотивації персоналу.

3. Інтеграція цифрових технологій у бізнес-процеси:

– у найближчі 2 роки завершити впровадження ERP-модулів для планування виробництва та управління ресурсами;

– розширити використання CRM-системи для підвищення якості роботи з клієнтами та прогнозування попиту;

– впровадити IoT-рішення для моніторингу обладнання, що дозволить знизити витрати на обслуговування на 15–20 %;

– використовувати Big Data-аналітику для прогнозування ринкових трендів і оптимізації логістики.

4. Управління ризиками цифрової трансформації:

– забезпечити кібербезпеку за рахунок впровадження систем багаторівневого захисту даних (ISO/IEC 27001).

– створити план цифрової безперервності бізнесу, що передбачає сценарії відновлення роботи у разі технічних збоїв чи кібератак.

– використовувати SWOT-аналіз щорічно для коригування цифрової стратегії залежно від змін зовнішнього середовища.

Рекомендовані напрями цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром» представлено в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Рекомендовані напрями цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром»

Напрям	Конкретні дії	Очікуваний ефект
Інвестиційна політика	Збільшення частки інвестицій у цифровізацію до 3–4 % доходу	Зростання NPV, ROI, IRR
Цифрові компетенції	Навчання персоналу, створення DCI-індикаторів	Приріст DCI до 0,65–0,70
Інтеграція технологій	ERP, CRM, IoT, Big Data	Зниження витрат на 10–15 %, підвищення продуктивності
Управління ризиками	Кібербезпека, план безперервності бізнесу	Мінімізація ймовірних втрат

Рекомендована стратегія для ПрАТ «ІнноваПром» полягає у реалізації базового сценарію з поступовим переходом до оптимістичного за рахунок зовнішніх джерел фінансування. Це дозволить досягти середньострокового приросту доходу на 15–20 %, скорочення витрат на 10–12 % та зростання

рентабельності до 9–10 %. У довгостроковій перспективі компанія зможе сформувати цифрову екосистему, що відповідатиме стандартам Індустрії 4.0 та забезпечить стійку конкурентоспроможність.

3.4. Висновки до розділу 3

У третьому розділі було здійснено практичну реалізацію агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації на прикладі ПрАТ «ІнноваПром». Проведений аналіз стану підприємства показав, що воно належить до категорії середніх промислових виробників із річним доходом близько 180 млн грн та середнім рівнем цифрової зрілості (DMI = 0,51). Основними передумовами трансформації визначено наявність часткової автоматизації виробництва, базові цифрові компетенції персоналу, а також потребу у підвищенні конкурентоспроможності в умовах глобальних змін, пов’язаних з Індустрією 4.0.

В межах моделі було виокремлено п’ять груп агентів (керівництво, працівники, клієнти, партнери, регулятори) та визначено їхні атрибути й взаємозв’язки. Побудована система індикаторів (DCI, DPI, DMI, IE) дала змогу кількісно оцінити рівень цифрової зрілості та динаміку його змін залежно від управлінських рішень та інвестицій у цифровізацію.

За допомогою сценарного аналізу розглянуто три варіанти розвитку: оптимістичний, базовий та стриманий. Результати моделювання свідчать, що:

– у оптимістичному сценарії дохід підприємства може зрости на 45 % за 5 років (до 260 млн грн), цифрова зрілість – до 0,75, а NPV перевищує 28 млн грн;

– у базовому сценарії приріст доходу становить 18 % (до 212 млн грн), цифрова зрілість досягає 0,62, а NPV дорівнює 9 млн грн;

– у стриманому сценарії приріст доходу обмежується 6 % (до 191 млн грн), а цифрова зрілість залишається на рівні 0,55, без суттєвого економічного ефекту.

Оцінка інтегральних фінансових показників (NPV, ROI, IRR) підтвердила, що найбільш вигідним є оптимістичний сценарій, однак його реалізація потребує значних інвестицій та зовнішньої підтримки. Базовий сценарій є реалістичним

компромісом, який забезпечує стійкий економічний ефект при прийнятному рівні ризику. Стриманий сценарій не створює доданої вартості та загрожує втратою конкурентних позицій.

Практичні рекомендації для ПрАТ «ІнноваПром» передбачають поступове впровадження базового сценарію з подальшим переходом до оптимістичного завдяки залученню зовнішніх джерел фінансування, розвитку цифрових компетенцій персоналу, інтеграції ERP, CRM, IoT та Big Data-технологій у бізнес-процеси та підвищенню рівня кібербезпеки.

Таким чином, реалізація агент-орієнтованої моделі довела, що цифрова трансформація може забезпечити істотне зростання ефективності, доходів і конкурентоспроможності підприємства, якщо вона здійснюється системно та з урахуванням ресурсних обмежень і ринкових умов.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено комплексне дослідження проблеми цифрової трансформації підприємств із використанням агент-орієнтованого моделювання. Робота поєднує теоретичні основи цифрової економіки, методологічні підходи до побудови агент-орієнтованих моделей соціально-економічних систем та практичну реалізацію моделі на прикладі ПрАТ «ІнноваПром».

У першому розділі проаналізовано сутність цифрової трансформації та її концепції, охарактеризовано міжнародний і вітчизняний досвід. Показано, що цифровізація виступає ключовим фактором конкурентоспроможності підприємств, а її успіх залежить від розвитку цифрових компетенцій персоналу, інтеграції бізнес-процесів та застосування нових бізнес-моделей.

У другому розділі розроблено концептуальну агент-орієнтовану модель цифрової екосистеми підприємства, визначено ключові фактори цифрової трансформації та запропоновано методологію дослідження сценаріїв розвитку. Модель дозволяє відтворювати динаміку взаємодії різних груп агентів (керівництва, працівників, клієнтів, партнерів, регуляторів) та оцінювати вплив управлінських рішень на цифрову зрілість і фінансові результати підприємства.

У третьому розділі проведено аналіз стану та передумов цифрової трансформації ПрАТ «ІнноваПром». Визначено, що підприємство має середній рівень цифрової зрілості (DMI = 0,51), базові компетенції персоналу та часткову автоматизацію, але відстає від міжнародних конкурентів за рівнем інтеграції процесів і інвестицій у цифрові технології.

Моделювання трьох сценаріїв (оптимістичного, базового та стриманого) показало, що оптимістичний сценарій забезпечує приріст доходу на 45 % і значне підвищення цифрової зрілості (DMI = 0,75), однак вимагає суттєвих інвестицій (≈9 млн грн/рік). Базовий сценарій є найбільш реалістичним компромісом, що дозволяє збільшити дохід на 18 % та досягти DMI = 0,62 при помірних витратах.

Стриманий сценарій практично не створює доданої вартості та підвищує ризик втрати конкурентоспроможності.

Розрахунок інтегральних показників (NPV, ROI, IRR) підтвердив доцільність реалізації базового сценарію з поступовим переходом до оптимістичного за рахунок зовнішніх джерел фінансування. Практичні рекомендації включають: збільшення інвестицій у цифровізацію до 3–4 % доходу, розвиток цифрових компетенцій персоналу, впровадження ERP, CRM, IoT, Big Data, посилення кібербезпеки та регулярне оновлення цифрової стратегії.

Наукова новизна роботи полягає у:

– розробці агент-орієнтованої моделі цифрової трансформації, адаптованої до умов українських промислових підприємств;

– інтеграції показників цифрової зрілості (DCI, DPI, DMI, IE) в єдину систему оцінювання ефектів трансформації;

– проведенні сценарного аналізу з урахуванням економічних результатів та управлінських ризиків.

Цифрова трансформація є необхідною умовою підвищення конкурентоспроможності українських підприємств. Агент-орієнтоване моделювання довело свою ефективність як інструмент оцінки сценаріїв розвитку та вибору оптимальної стратегії. Для ПрАТ «ІнноваПром» найбільш доцільною є стратегія реалізації базового сценарію з поступовим нарощуванням інвестицій і переходом до оптимістичного, що забезпечить стійке економічне зростання та інтеграцію у глобальну цифрову економіку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gartner IT Glossary. Digital Transformation. URL: https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-transformation (дата звернення: 04.11.2025).

2. Тарасова В. В., Мельник І. В. Цифрова трансформація бізнес-моделей підприємств: теоретичні аспекти. *Економіка та держава*. 2021. № 6. С. 45–49.

3. Reis J., Amorim M., Melão N., Matos P. Digital transformation: a literature review and guidelines for future research. *World Conference on Information Systems and Technologies*. Cham: Springer, 2018. С. 411–421.

4. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2017. 192 с.

5. Kagermann H., Wahlster W., Helbig J. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group. Berlin: Acatech, 2013. 78 с.

6. McKinsey & Company. The platform play: How to operate like a tech company. URL: https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/the-platform-play (дата звернення: 04.11.2025).

7. Jacobides M. G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*. 2018. Vol. 39(8). P. 2255–2276.

8. Davenport T. H. Process Innovation: Reengineering Work through Information Technology. Boston: Harvard Business School Press, 1993. 337 с.

9. Laudon K. C., Laudon J. P. Management Information Systems: Managing the Digital Firm. Harlow: Pearson, 2016. 648 с.

10. Westerman G., Bonnet D., McAfee A. Leading Digital: Turning Technology into Business Transformation. Boston: Harvard Business Review Press, 2014. 292 с.

11. Bukht R., Heeks R. Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy. *International Organisations Research Journal*. 2018. Vol. 13(2). P. 143–172.

12. Vial G. Understanding digital transformation: a review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2019. Vol. 28(2). P. 118–144.

13. PwC. 24th Annual Global CEO Survey: Delivering sustained outcomes through digital transformation. URL: https://www.pwc.com/gx/en/ceo-survey/2021.html (дата звернення: 04.11.2025).

14. OECD. Skills for a Digital World. Policy Brief on the Future of Work. Paris: OECD Publishing, 2016. 20 с.

15. IBM. Cost of a Data Breach Report 2023. URL: https://www.ibm.com/reports/data-breach (дата звернення: 04.11.2025).

16. Macal C. M., North M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation // Journal of Simulation. 2010. Vol. 4(3). P. 151–162.

17. Gardner M. Mathematical Games: The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "Life". *Scientific American*. 1970. Vol. 223(4). P. 120–123.

18. Epstein J. M., Axtell R. Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up. Washington, D.C.: Brookings Institution Press, 1996. 208 с.

19. Tesfatsion L. Agent-based computational economics: Growing economies from the bottom up. *Artificial Life*. 2002. Vol. 8(1). P. 55–82.

20. Tesfatsion L. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory. *Handbook of Computational Economics*. 2006. Vol. 2. P. 831–880.

21. LeBaron B. Agent-based computational finance. *Handbook of Computational Economics*. 2006. Vol. 2. P. 1187–1233.

22. Dosi G., Fagiolo G., Roventini A. Schumpeter meeting Keynes: A policy-friendly model of endogenous growth and business cycles. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2010. Vol. 34(9). P. 1748–1767.

23. Dawid H., Harting P., Neugart M. Economic convergence: Policy implications from a heterogeneous agent model. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2014. Vol. 44. P. 54–80.

24. Tesfatsion L., Judd K. L. Handbook of Computational Economics. Vol. 2: Agent-Based Computational Economics. Amsterdam: Elsevier, 2006. 900 с.

25. Gilbert N., Troitzsch K. Simulation for the Social Scientist. 2nd ed. Maidenhead: Open University Press, 2005. 311 с.

26. Gavré F., Hamill L., Gilbert N. Agent-based modelling and simulation in the social sciences: From policy to practice. *Complexity*. 2020. P. 1–15.

27. Cincotti S., Raberto M., Teglio A. The Eurace macroeconomic model and simulator. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2010. Vol. 13(1). P. 2–17.

28. LeBaron B. Agent-based computational finance: Suggested readings and early research. *Journal of Economic Dynamics and Control*. 2001. Vol. 25(3–4). P. 351–372.

29. Deziel G., Fortin M. Agent-based modeling of supply chain resilience: a comprehensive review. *Journal of Simulation*. 2020. Vol. 14(2). P. 93–110.

30. Batty M. The New Science of Cities. Cambridge, MA: MIT Press, 2013. 496 с.

31. Bassi A. M., Gallagher L. Agent-based modeling and the sustainable transition. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2020. Vol. 37. P. 1–3.

32. European Commission. Digital Europe Programme (2021–2027). URL: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme (дата звернення: 04.11.2025).

33. Gill M., VanBoskirk S. The Digital Maturity Model 4.0. Forrester Research, 2016. 32 с.

34. Kane G. C., Palmer D., Phillips A. N., Kiron D., Buckley N. Strategy, not technology, drives digital transformation. *MIT Sloan Management Review*. 2015. Vol. 14. P. 1–25.

35. Li L. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0". *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 135. P. 66–74.

36. Siemens AG. MindSphere – The Internet of Things Operating System. URL: https://siemens.mindsphere.io (дата звернення: 04.11.2025).

37. Iansiti M., Lakhani K. R. The truth about blockchain. *Harvard Business Review*. 2017. Vol. 95(1). P. 118–127.

38. IBM & Maersk. TradeLens: How blockchain is changing global trade. URL: https://www.tradelens.com (дата звернення: 04.11.2025).

39. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.

40. Міністерство цифрової трансформації України. Стратегія цифрової трансформації. URL: https://thedigital.gov.ua (дата звернення: 04.11.2025).

41. European Commission. eGovernment Benchmark 2022. Luxembourg: Publications Office of the EU, 2022. 92 с.

42. Pavlenko O., Myroshnychenko I. Digital banking in Ukraine: challenges and opportunities. *Financial Markets, Institutions and Risks*. 2021. Vol. 5(1). P. 34–42.

43. DTEK. Digital DTEK: Transforming the Energy Sector. URL: https://dtek.com (дата звернення: 04.11.2025).

44. Kyivstar. Big Data Solutions. URL: https://kyivstar.ua (дата звернення: 04.11.2025).

45. European Investment Bank. Digitalisation in Europe 2022–2023: Evidence from the EIB Investment Survey. Luxembourg: EIB, 2023. 142 с.

46. World Bank. Digital Transformation of the Economy in Eastern Europe: Opportunities and Challenges. Washington, D.C.: World Bank, 2022. 85 с.

47. Macal C. M., North M. J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. *Journal of Simulation*. 2010. Vol. 4(3). P. 151–162.

48. Gill M., VanBoskirk S. The Digital Maturity Model 4.0. Forrester Research, 2016.

49. Kane G. C., Palmer D., Phillips A. N. Strategy, not technology, drives digital transformation. MIT Sloan Management Review. 2015.

50. Deloitte. The Fourth Industrial Revolution is here – are you ready? Deloitte Insights, 2018.

51. PwC. Industry 4.0: Building the Digital Enterprise. 2016.

52. Jacobides M. G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*. 2018. Vol. 39(8). P. 2255–2276.

53. Rong K., Hu G., Lin Y., Shi Y. Understanding business ecosystem using a 6C framework in Internet-of-Things-based sectors. *International Journal of Production Economics*. 2015. Vol. 159. P. 41–55.

54. Vial G. Understanding digital transformation: a review and a research agenda. *The Journal of Strategic Information Systems*. 2019. Vol. 28(2). P. 118–144.

55. Macal C. M., North M. J. Agent-based modeling and simulation: ABMS examples and future directions. *Proceedings of the Winter Simulation Conference*. 2005. P. 2–15.

56. North M. J., Macal C. M. Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation. Oxford: Oxford University Press, 2007. 244 c.

57. Gilbert N. Agent-based models. London: Sage Publications, 2008. 112 c.

58. Schoemaker P. J. H. Scenario Planning in Organizations: How to Create, Use, and Assess Scenarios. *Technological Forecasting and Social Change*. 1995. Vol. 49(2). P. 159–176.

59. Chermack T. J. Scenario planning in organizations: How to create, use, and assess scenarios. San Francisco: Berrett-Koehler, 2011. 240 c.

60. Verhoef P. C., Broekhuizen T., Bart Y. et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda. *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 122. P. 889–901.

61. Gill M., VanBoskirk S. The Digital Maturity Model 4.0. Forrester Research, 2016.

62. Wamba S. F., Gunasekaran A., Akter S., Ren S. Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities. *Journal of Business Research*. 2017. Vol. 70. P. 356–365.