

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет бізнес-технологій та економіки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра економіки та митної справи
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА ДИПЛОМНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**на тему: «Розумні фабрики» як фактор підвищення
конкурентоспроможності компаній та країн на світовому ринку**

Виконав
студент 2 курсу, групи БТЕ-1914м
спеціальності 292 «Міжнародні економічні
відносини», ОП «Міжнародний бізнес»
(код і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Милованкін С.А
(прізвище та ініціали студента)

Керівник Лазнева І.О.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали)

м. Запоріжжя
2025 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет: бізнес-технологій та економіки

Кафедра: економіки та митної справи

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Спеціальність: 292 «Міжнародні економічні відносини», ОПП «Міжнародний бізнес»

Галузь знань: 29 міжнародні відносини

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, к.держ.упр.,
доцент

_____ Андрій СОКОЛОВ

“ _____ ” _____ 20__ року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ ДИПЛОМНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ**

Милованкіну Сергію Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розумні фабрики» як фактор підвищення
конкурентоспроможності компаній та країн на світовому ринку

керівник роботи к.і.н., доцент, Лазнева Ірина Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «31» жовтня 2025 року
№494

2. Термін подання здобувачем роботи 10 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи праці українських і зарубіжних вчених, матеріали
періодичних видань, статистичні матеріали, законодавчі акти, внутрішня
документація підприємства

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) 1. Теоретичні основи цифрової трансформації та розвитку
«розумних фабрик» 2. Аналіз світового досвіду у впровадженні «розумних
фабрик». 3. Перспективи впровадження «розумних фабрик» для підвищення
конкурентоспроможності міжнародного бізнесу

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
16 таблиць, 9 рисунків

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
Розділ 1	Лазнева І.О., доцент кафедри ЕМС	01.10.25	05.11.25
Розділ 2	Лазнева І.О., доцент кафедри ЕМС	14.10.25	12.11.25
Розділ 3	Лазнева І.О., доцент кафедри ЕМС	14.10.25	19.11.25
Нормоконтроль	Лазнева І.О., доцент кафедри ЕМС	01.12.25	06.12.25

7. Дата видачі завдання «01» жовтня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження теми, складання змісту	02.09.25-11.09.25	
2	Вивчення літературних джерел	15.09.25-23.10.25	
3	Збір матеріалу на дипломну роботу	15.09.25-05.11.25	
4	Групування та аналіз зібраного матеріалу	14.10.25-05.11.25	
5	Виконання першого розділу	14.10.25-05.11.25	
6	Виконання другого розділу	16.10.25-12.11.25	
7	Виконання третього розділу	05.11.25-19.11.25	
8	Формування висновків та рекомендацій	20.11.25-26.11.25	
9	Оформлення дипломної роботи	05.11.25-26.11.25	
10	Перевірка роботи керівником	27.11.25-30.11.25	
11	Одержання відгуку та рецензії	08.12.25	
12	Попередній захист дипломної роботи	04.12.25-08.12.25	
13	Подання роботи на кафедру	17.12.25	
14	Захист дипломної роботи	19.12.25-24.12.25	

Здобувач

(підпис)

Милованкін С.А.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Лазнева І.О.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

КДМР: 108 с., 16 табл., 9 рис., 3 дод., 67 джерел.

Мета дослідження – виявлення переваг впровадження «розумних фабрик» та оцінка їх впливу на інноваційну активність підприємств та конкурентні позиції країн у глобальній економіці.

Об’єкт дослідження – «розумні фабрики» як складова глобальної промислової конкурентоспроможності.

Предмет дослідження – економічні механізми, моделі та інструменти підвищення конкурентоспроможності країн і компаній на основі впровадження технологій «розумних фабрик».

Методи дослідження – системний, інституційний та порівняльний підходи; економіко-статистичний аналіз динаміки та структури показників роботизації, цифровізації й енергоємності; порівняльний аналіз країн і компаній; кейс-стаді підприємств Global Lighthouse Network; графічний і табличний методи.

Анотація. У роботі розглянуто ретроспективу індустріальних революцій і теоретико-методологічні підходи до трактування поняття «розумна фабрика», систематизовано її цифрову архітектуру та канали впливу на мікро-, та макрорівневу конкурентоспроможність. Проаналізовано світові тенденції роботизації й цифрової трансформації промисловості, програми розвитку «розумних фабрик» у провідних країнах та кейси транснаціональних корпорацій. Запропоновано інтегровану рамку оцінювання впливу «розумних фабрик» за вимірами ефективності, інноваційності та сталого розвитку, сформульовано рекомендації щодо їх впровадження в міжнародному бізнесі та промисловій політиці України.

РОЗУМНІ ФАБРИКИ, ІНДУСТРІЯ 4.0, ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ,
КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЬ, ІННОВАЦІЇ, МІЖНАРОДНА
ЕКОНОМІКА, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗВИТОК, ГЛОБАЛЬНІ РИНКИ

Abstract. The study examines the retrospective of industrial revolutions and the theoretical-methodological approaches to interpreting the concept of a “smart factory.” It systematizes its digital architecture and the channels through which it affects micro- and macro-level competitiveness. Global trends in industrial robotization and digital transformation, as well as smart factory development programs in leading countries and case studies of multinational corporations, are analyzed. An integrated assessment framework for evaluating the impact of smart factories across the dimensions of efficiency, innovativeness, and sustainable development is proposed, and recommendations for their implementation in international business and in Ukraine’s industrial policy are formulated.

SMART FACTORIES, INDUSTRY 4.0, DIGITAL TRANSFORMATION,
COMPETITIVENESS, INNOVATION, INTERNATIONAL ECONOMICS,
TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT, GLOBAL MARKET

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення / Абревіатура	Пояснення
AI/ML	Artificial Intelligence / Machine Learning — Штучний інтелект / Машинне навчання
AMR	Autonomous Mobile Robot — автономний мобільний робот
AR/VR	Augmented Reality / Virtual Reality — технології доповненої і віртуальної реальності
BCG	Boston Consulting Group — міжнародна консалтингова компанія
CAD	Computer-Aided Design — системи автоматизованого проектування
CAM	Computer-Aided Manufacturing — системи автоматизованого виробництва
COVID	Coronavirus Disease — коронавірусна хвороба
CPS	Cyber-Physical Systems — кіберфізичні системи
DT	Digital Twin — цифровий двійник
ERP	Enterprise Resource Planning — система планування ресурсів підприємства
ESG	Environmental, Social and Governance — екологічні, соціальні та управлінські стандарти
FTSE	Financial Times Stock Exchange — індексна класифікація FTSE Russell
IEC	International Electrotechnical Commission — Міжнародна електротехнічна комісія
IFR	International Federation of Robotics — Міжнародна федерація робототехніки
IIoT	Industrial Internet of Things — промисловий Інтернет речей
IoT	Internet of Things — Інтернет речей
ISO	International Organization for Standardization — Міжнародна організація зі стандартизації
KPI	Key Performance Indicators — ключові показники ефективності
MES	Manufacturing Execution System — система диспетчерського керування виробництвом
OEE	Overall Equipment Effectiveness — загальна ефективність обладнання
OTA	Over-the-Air — бездротове оновлення/передавання даних
PdM	Predictive Maintenance — прогнозне технічне обслуговування
PLM	Product Lifecycle Management — управління життєвим циклом продукту

PwC	PricewaterhouseCoopers — міжнародна аудиторсько-консалтингова компанія
ROI	Return on Investment — рентабельність інвестицій
SCM	Supply Chain Management — управління ланцюгами постачання
TSN	Time-Sensitive Networking — часово чутливі мережі
VDI	Virtual Desktop Infrastructure — віртуальна десктопна інфраструктура
ЄС	Європейський Союз
ІКТ	Інформаційно-комунікаційні технології
ІТ	інформаційні технології
ВВП	Валовий внутрішній продукт
ВЕФ	Всесвітній економічний форум
КНР	Китайська Народна Республіка
МВФ	Міжнародний валютний фонд
МСП	малі та середні підприємства
ОЕСР	Організація економічного співробітництва та розвитку
ОТ	операційні технології
США	Сполучені Штати Америки
ТНК	транснаціональні корпорації
ЮНІДО	Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку
див.	дивитися
дол.	долар
м.	місто
млн.	мільйон
р.	рік
рр.	роки
с.	сторінка
табл.	таблиця
тис.	тисяча
трлн.	трильйон

ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну дипломну магістерську роботу.....	2
Реферат	4
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів	6
Зміст	8
Вступ	10
1 Теоретичні основи цифрової трансформації та розвитку «розумних фабрик»	15
1.1 Ретроспектива промислових революцій та передумови появи «розумних фабрик».....	15
1.2 Цифрові технології як основа функціонування та розвитку «розумних фабрик».....	21
1.3 «Розумні фабрики» як елемент глобальної конкурентоспроможності країн і компаній.....	28
2 Аналіз світового досвіду у впровадженні «розумних фабрик»	35
2.1 Глобальні драйвери та бар'єри впровадження «розумних фабрик».....	35
2.2 Кращі міжнародні практики: кейси Bosch, Siemens, Tesla, Foxconn, BMW	43
2.3 Порівняльний аналіз рівня цифровізації виробництва у провідних країнах світу	51
3 Перспективи впровадження «розумних фабрик» для підвищення конкурентоспроможності міжнародного бізнесу	63
3.1 Вплив «розумних фабрик» на ефективність, інноваційність та сталий розвиток	63
3.2 Практичні рекомендації для транснаціональних корпорацій щодо впровадження «розумних фабрик»	68
3.3 Можливості інтеграції технологій «розумних фабрик» у країнах, що розвиваються	78
Висновки.....	88

Перелік джерел посилань.....	93
Додаток А Цифрові технології, що використовуються в індустрії «розумних фабрик».....	102
Додаток Б Основні канали впливу “розумних фабрик” на конкурентоспроможність підприємств і національних економік.....	104
Додаток В Основні параметри кейсів впровадження «розумних фабрик» у провідних компаніях	106

ВСТУП

Актуальність обраної теми дослідження зумовлена поглибленням глобальної конкуренції, прискореною цифровою трансформацією промисловості та переходом до нової промислової парадигми Індустрії 4.0. У цих умовах одним із ключових чинників підвищення міжнародної конкурентоспроможності стає впровадження концепції «розумних фабрик», які забезпечують інтеграцію кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, цифрових двійників, аналітики даних та штучного інтелекту в єдину архітектуру створення вартості. Такі виробничі системи дають змогу істотно підвищувати продуктивність праці та капіталу, скорочувати виробничі цикли, покращувати якість продукції, енергоефективність та екологічні показники, що прямо транслюється в конкурентні позиції компаній і країн на світових ринках.

Розвинені держави (Німеччина, США, Японія, Південна Корея, Китай) реалізують комплексні програми цифрової індустріалізації, спрямовані на розвиток «розумних фабрик» і формування національних екосистем смарт-виробництва, що підтверджується зростанням щільності промислових роботів, поширенням хмарних сервісів, аналітики даних та промислового Інтернету речей. Участь підприємств цих країн у глобальній мережі Global Lighthouse Network демонструє, що системне впровадження технологій четвертої промислової революції забезпечує відчутне зростання продуктивності та інноваційної спроможності бізнесу. Для України, яка поєднує потребу в післявоєнному відновленні промисловості з необхідністю довгострокової структурної модернізації, розвиток «розумних фабрик» є стратегічним напрямом посилення позицій у глобальних ланцюгах створення вартості та джерелом стійкого економічного зростання.

У цьому контексті особливого значення набуває дослідження економічних механізмів, моделей та інструментів, за допомогою яких «розумні фабрики» впливають на ефективність, інноваційну динаміку та сталий розвиток міжнародного бізнесу, а також формування рекомендацій щодо їх імплементації

в Україні з урахуванням світових тенденцій і внутрішніх обмежень. Концептуальні засади розуміння цих процесів поглиблені у працях К. Шваба, який акцентує на системному характері технологічних зрушень; Е. Лі, що досліджує архітектуру кіберфізичних систем; Л. Карузо, який аналізує цифрові інновації та їхній вплив на промислові екосистеми; Ч. Лі, С. Чуна та М. Кіма, що розглядають стратегічне управління «смарт»-фабриками; а також М. Риялата, Х. ЕльМоакета та М. АльФаурі, котрі розробляють моделі проектування виробничих систем на основі IoT та CPS. Значущим є й внесок українських науковців — В. П. Вишневського, С. І. Князева, Ю. В. Касперовича та Д. Ю. Череватського — які комплексно досліджують напрями становлення та проблематику розвитку смарт-промисловості в Україні. Сукупність цих наукових підходів формує теоретико-методологічну основу дослідження та підтверджує актуальність обраної теми магістерської роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрям дослідження відповідає науковим пріоритетам кафедри економіки та митної справи Національного університету «Запорізька політехніка» та пов'язаний із виконанням її комплексних наукових досліджень у сфері цифрової трансформації промисловості та міжнародного бізнесу.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської роботи є виявлення переваг впровадження «розумних фабрик» та оцінка їх впливу на інноваційну активність підприємств та конкурентні позиції країн у глобальній економіці. Відповідно до поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- узагальнити ретроспективу індустріальних революцій і теоретико-методологічні підходи до трактування «розумних фабрик» у контексті Індустрії 4.0 та міжнародної конкурентоспроможності;

- систематизувати цифрові технології та референс-архітектуру «розумної фабрики», визначивши їхню роль у формуванні динамічних здібностей підприємств і інтеграції в глобальні ланцюги створення вартості;

- обґрунтувати роль «розумних фабрик» як системного чинника формування глобальної конкурентоспроможності підприємств і національних економік у багаторівневій економічній системі;
- узагальнити глобальні драйвери та бар'єри впровадження «розумних фабрик» в умовах світової конкуренції;
- дослідити досвід транснаціональних корпорацій та підприємств-учасників Global Lighthouse Network щодо впровадження «розумних фабрик» і оцінити їхній внесок у формування конкурентних переваг міжнародного бізнесу;
- проаналізувати світові тенденції та інституційні умови розвитку «розумних фабрик», зокрема показники роботизації, цифровізації, промислового Інтернету речей і програми підтримки смарт-виробництва в провідних країнах;
- запропонувати інтегровану рамку оцінювання впливу «розумних фабрик» на ефективність, інноваційність та сталий розвиток і на цій основі розробити рекомендації щодо впровадження «розумних фабрик» у корпоративних стратегіях та промисловій політиці України.

Об'єкт дослідження – «розумні фабрики» як складова глобальної промислової конкурентоспроможності.

Предмет дослідження – економічні механізми, моделі та інструменти підвищення конкурентоспроможності країн і компаній на основі впровадження технологій «розумних фабрик».

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є системний, інституційний та порівняльний підходи, що дають змогу розглядати «розумні фабрики» як елемент взаємопов'язаних мікро-, мезо- та макрорівневих процесів підвищення конкурентоспроможності. Для досягнення поставленої мети використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: аналіз і синтез, індукцію та дедукцію – для опрацювання теоретичних засад та еволюції індустріальних революцій; методи економіко-статистичного аналізу (табличний, графічний, аналіз динаміки та структури показників роботизації, цифровізації та енергоємності виробництва) – для оцінювання тенденцій розвитку смарт-виробництва в різних країнах; порівняльний аналіз – для зіставлення

міжнародних практик впровадження «розумних фабрик» та позицій країн у глобальних ланцюгах створення вартості; метод кейс-стаді – для глибинного аналізу досвіду транснаціональних корпорацій і підприємств Global Lighthouse Network; графічний і табличний методи.

Інформаційну базу роботи становлять аналітичні звіти міжнародних організацій (ОЕСР, ВЕФ, ЮНІДО, Eurostat, Світового банку), статистичні дані національних і наднаціональних інституцій, законодавчі та нормативні акти України у сфері промислової та цифрової політики, офіційна звітність промислових компаній та учасників Global Lighthouse Network, дослідження провідних консалтингових компаній (McKinsey, PwC, Deloitte, BCG, Capgemini), а також наукові праці вітчизняних та зарубіжних авторів, присвячені Індустрії 4.0, «розумним фабрикам» та міжнародній конкурентоспроможності.

Наукова новизна магістерської роботи полягає в поглибленні теоретико-методологічних засад дослідження «розумних фабрик» та розробці підходів до оцінювання їхнього впливу на конкурентоспроможність міжнародного бізнесу та національної промисловості. Зокрема:

- удосконалено понятійно-категоріальний апарат дослідження «розумних фабрик» як чинника глобальної конкурентоспроможності, що, на відміну від існуючих підходів, розглядає їх як вузлову ланку взаємодії мікро-, мезо- та макрорівнів (підприємств, кластерів, національної економіки);

- набуло подальшого розвитку систематизація цифрових технологій і референс-архітектури «розумної фабрики» як цілісної даноцентричної платформи, що забезпечує формування динамічних здібностей підприємств і їх інтеграцію в глобальні ланцюги створення вартості з високою доданою вартістю;

- удосконалено методичний підхід до оцінювання впливу «розумних фабрик» на міжнародну конкурентоспроможність, який ґрунтується на інтегрований рамці аналізу за трьома взаємопов'язаними вимірами – ефективність, інноваційність та сталий розвиток;

- запропоновано комплекс рекомендацій щодо впровадження «розумних фабрик» у стратегіях міжнародного бізнесу та промисловій політиці України, що

враховує світовий досвід, структурні обмеження національної економіки та завдання післявоєнної відбудови.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання запропонованих підходів та рекомендацій промисловими підприємствами й транснаціональними корпораціями при плануванні та реалізації проєктів упровадження «розумних фабрик», а також органами державної влади та галузевими об'єднаннями під час розробки політики цифрової індустріалізації, програм підтримки Індустрії 4.0 та стратегії відновлення промисловості України.

Апробація результатів дипломної роботи. Ключові науково-практичні положення й висновки кваліфікаційної роботи оприлюднені автором і отримали позитивну оцінку на двох науково-практичних заходах: III Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні тренди соціально-економічних перетворень та інтелектуалізації суспільства в умовах сталого розвитку» (20-21 жовтня 2025 р. м. Запоріжжя), IV Міжнародна науково-практична конференція «Scientific Innovation: Theoretical Insights and Practical Impacts» (8-10 грудня 2025 р. м. Неаполь, Італія) з публікацією тез доповідей.

Структура і обсяг роботи. Дипломна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків; містить 108 сторінок тексту, 9 рисунків, 16 таблиць, 3 додатки. Перелік джерел посилань включає 67 найменувань.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ТА РОЗВИТКУ «РОЗУМНИХ ФАБРИК»

1.1 Ретроспектива промислових революцій та передумови появи «розумних фабрик»

Еволюція промислового розвитку – це тривалий процес переходу від механічних способів підвищення продуктивності до керованих даними й знаннями виробничих систем. У сучасній літературі для його опису зазвичай використовують концепцію послідовних промислових (індустріальних) революцій, які умовно поділяють на чотири хвилі. Кожна з них охоплює не лише зміну технологічного базису, а й глибоку трансформацію організації виробництва, структури зайнятості, інституційного середовища та міжнародної кооперації. Саме ця тривала траєкторія – від механізації до цифрових мереж – створила підґрунтя для формування сучасної парадигми «розумних фабрик».

Першу промислову революцію (Індустрія 1.0) зазвичай датують кінцем XVIII – першою половиною XIX ст. Вона була пов'язана з переходом від ручної праці до механізованого виробництва на основі парових машин. Технічними ядрами цього етапу стали вдосконалені парові двигуни, нові технології виплавки чавуну і сталі, механічні верстати та ткацькі машини. Виробництво вийшло за межі ремісничої мануфактури: склалася фабрична система з концентрацією капіталу та праці, чітким поділом функцій, систематичним використанням найманої праці. Одночасно розгорталася «транспортна революція» – будівництво каналів і залізниць, розвиток пароплавства, що різко зменшило транзакційні витрати й прискорило переміщення сировини та готової продукції. Це сприяло розширенню географії ринків збуту, формуванню національних ринків і зміцненню позицій країн, які першими змогли індустріалізуватися.

Наступний етап, який пов'язують із другою промисловою революцією (Індустрія 2.0), розгортався наприкінці XIX – у першій половині XX ст. Його технологічною основою стали електрифікація виробництва, розвиток двигунів внутрішнього згоряння, масове виробництво сталі, хімічних продуктів, засобів

транспорту та зв'язку. Ключовою організаційною інновацією цього періоду була конвеєрна система та стандартизація деталей, які забезпечили різке зниження собівартості продукції й зробили масове споживання матеріальних благ економічно можливим. Поширення принципів наукового управління, нормування праці, впровадження поточних ліній і фордистської моделі організації виробництва сприяло підвищенню продуктивності, але водночас загостило проблему монотонності праці та конфліктів між капіталом і працею. Зміцнилися позиції вертикально інтегрованих корпорацій, сформувалися централізовані системи інфраструктури (енергетика, транспорт, комунальні послуги), а урбанізація і концентрація виробництва поставили нові завдання перед державною регуляторною політикою.

Третю промислову революцію (Індустрія 3.0) пов'язують із поширенням електроніки, мікропроцесорної техніки, інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та автоматизованих систем керування, що розпочалося у 1960–1970-х роках. Ключовими технологічними елементами цього етапу стали програмовані логічні контролери, числове програмне керування верстатами, системи диспетчерського контролю та збору даних, промислові роботи, а також комп'ютерні системи проєктування та виробництва. Ці інновації забезпечили якісне зростання точності, відтворюваності й швидкості виробничих операцій, дозволили автоматизувати контроль якості, скоротити втрати часу й матеріалів. У відповідь на посилення конкурентного тиску та насичення ринків розвиваються концепції гнучкого автоматизованого виробництва, «бережливого виробництва», системи «точно вчасно», орієнтовані на мінімізацію запасів і адаптивність до коливань попиту.

Важливим наслідком третьої промислової революції стало формування глобальних ланцюгів створення вартості. Завдяки розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, зниженню транспортних витрат і можливості стандартизувати технологічні процеси виробництва компанії масово переносили окремі стадії виробництва в країни з нижчою вартістю праці, що зумовило офшоринг і появу складних мереж контрактного виробництва. Водночас це

посилило структурні відмінності між країнами: одні спеціалізувалися на наукоємних етапах із високою доданою вартістю, інші – на трудомістких операціях з низькими бар'єрами входу. Попри значний прогрес у сфері автоматизації, третя промислова революція загалом характеризувалася фрагментарною, «острівною» інтеграцією: цифрові системи забезпечували високий рівень автоматизації окремих ліній, цехів або функцій, але рідко формували наскрізний інформаційний потік від проєктування до сервісного обслуговування виробу протягом усього життєвого циклу.

На початку ХХІ ст. на базі досягнень у сфері ІКТ, інтернету, хмарних сервісів, обчислювальних потужностей і сенсорики формується нова парадигма, яку позначають як четверту промислову революцію (Індустрія 4.0). У сучасній економічній літературі вона розглядається не просто як наступний крок автоматизації, а як якісний зсув у способі організації виробництва, обміну й створення вартості. Клаус Шваб описує її як етап глибокого злиття фізичного, цифрового та біологічного вимірів, коли технології змінюють не лише виробничі процеси, а й бізнес-моделі, ринки праці, структуру влади й повсякденні практики людей [2]. Подібні акценти на трансформації промислових систем, енергетики та міської інфраструктури під впливом Індустрії 4.0 простежуються й у сучасних дослідженнях смарт-промисловості та цифрової модернізації [3; 4]. Хронологія промислових революцій представлена на рис. 1.1.

З цієї перспективи Індустрія 4.0 – це не тільки кіберфізичні системи, промисловий Інтернет речей, хмарні та периферійні обчислення, аналітика даних, штучний інтелект, робототехніка, адитивне виробництво й цифрові двійники, інтегровані в єдині мережеві екосистеми, де машини, люди й програмні агенти взаємодіють у реальному часі.



Рисунок 1.1 - Хронологія промислових революцій*

*Джерело: [1]

На відміну від третьої промислової революції, зорієнтованої насамперед на автоматизацію окремих операцій і ліній, четверта революція змінює архітектуру ланцюгів створення вартості в цілому: від проектування продукту та гнучкого виробництва на «розумних фабриках» до сервісних бізнес-моделей, заснованих на даних (прогнозне обслуговування, «продукт-як-послуга», промислові цифрові платформи). Її наслідки виходять далеко за межі технологій: йдеться про перерозподіл ролей між працею і капіталом, зміну структури попиту на навички, появу нових форм зайнятості й підприємництва, посилення конкуренції між країнами за розміщення високотехнологічних виробництв, а також ризики цифрового розриву, концентрації ринкової влади платформ, загроз конфіденційності та кібербезпеки.

Водночас у науковому дискурсі посилюється критичне осмислення переважно оптимістичного наративу щодо Індустрії 4.0. Зокрема, Лоріс Карузо

показує, що образи «четвертої промислової революції» формуються не лише академічною спільнотою, а й державними інституціями та корпоративними акторами, які акцентують увагу на потенціалі зростання продуктивності, створення нових можливостей для бізнесу та «майбутнього роботи». Натомість реальні соціально-економічні трансформації мають суперечливий характер: цифрові інновації супроводжуються ризиками нестабільної зайнятості, поляризації ринку праці, посилення контролю та нерівності, а фактичні результати залежать від інституційного й політичного контексту впровадження технологій [5].

Узагальнену характеристику чотирьох промислових революцій у розрізі джерел продуктивності, організаційних інновацій та ключових соціально-економічних наслідків подано в табл. 1.1. Така систематизація дозволяє чіткіше показати еволюцію індустріальної парадигми та логіку переходу до умов, у яких формуються «розумні фабрики».

Таблиця 1.1 – Від Індустрії 1.0 до 4.0: джерела продуктивності, організаційні інновації, соціально-економічні наслідки*

Період парадигма	Ключові джерела продуктивності	Організаційні інновації	Соціально-економічні наслідки
Індустрія 1.0 Кінець XVIII – сер. XIX ст.	Механізація ручної праці; парові машини та водяні колеса; різке зростання випуску завдяки новим джерелам енергії.	Перехід від мануфактури до фабрично-заводської системи; поділ праці; концентрація виробництва у промислових центрах.	Прискорена урбанізація; формування промислового робітничого класу; погіршення умов праці й поява перших соціальних реформ.
Індустрія 2.0 Кінець XIX – сер. XX ст.	Електрифікація виробництва; конвеєр і стандартизовані деталі; масове виробництво з низькою собівартістю.	Тейлоризм і фордизм; наукова організація праці; поточні лінії; вертикально інтегровані корпорації з жорсткою ієрархією.	Формування масового споживання й «суспільства достатку»; зростання доходів і «середнього класу»; водночас – монотонність праці, профспілкові конфлікти, циклічні кризи.
Індустрія 3.0 З 1960-х рр.	Електроніка, комп'ютери, мікропроцесори; автоматизовані лінії; робототехніка;	Гнучке автоматизоване виробництво; «бережливе виробництво» та	Зростання продуктивності й якості; офшоринг і формування глобальних ланцюгів створення вартості; поляризація ринку праці та

Період парадигма	Ключові джерела продуктивності	Організаційні інновації	Соціально-економічні наслідки
	CAD/CAM; підвищення точності й гнучкості виробництва.	система «точно вчасно»; інтеграція виробництва з логістикою через ІКТ; постфордистські моделі організації праці.	поява цифрового розриву між країнами.
Індустрія 4.0 Початок XXI ст.	Кіберфізичні системи, IoT/ПоТ, хмарні платформи, аналітика даних і ШІ; гнучке масове кастомізоване виробництво; підвищення енергоефективності й якості.	Мережеві «розумні фабрики»; горизонтально інтегровані ланцюги створення вартості; сервісні бізнес-моделі на основі даних; тісна взаємодія людини й роботів.	Зростання конкурентоспроможності та екологічної стійкості; водночас ризики посилення нерівності, витіснення частини працівників, потреба в масовому рескілінгу та новій політиці зайнятості.

*Джерело: складено автором за [6]

Сукупність змін, пов'язаних із чотирма промисловими революціями, створила комплексні передумови для формування концепції «розумних фабрик». З технологічного погляду необхідною умовою стало накопичення рішень у сфері автоматизації та цифровізації: від механічних систем і електрифікації до мікропроцесорної техніки, промислових мереж, датчиків, хмарних і периферійних обчислень. Саме поєднання зрілих технологій автоматизованого керування, доступних засобів зв'язку, мініатюрних сенсорів і потужних алгоритмів обробки даних створило можливість побудови наскрізно під'єданого виробничого середовища, де кожен об'єкт, процес і ресурс може бути ідентифікований, відстежений і оптимізований у режимі реального часу.

Організаційні передумови сформувалися внаслідок поширення концепцій гнучкого та бережливого виробництва, зростання варіативності попиту й скорочення життєвих циклів продукції. Підприємства змушені переходити від жорстких конвеєрних схем до адаптивних виробничих систем, здатних працювати з невеликими серіями, широкою номенклатурою та частими змінами конфігурацій. Це потребує іншої логіки планування, координації та контролю – такої, яку можна забезпечити лише за умови глибокої цифрової інтеграції всіх

етапів створення вартості. Важливу роль відіграють також інституційні та ринкові чинники: державні стратегії цифрової трансформації промисловості, стандарти безпеки й взаємодії, політика підтримки інновацій, тиск з боку глобальної конкуренції та очікування споживачів щодо індивідуалізованої продукції, високої якості й сталості виробництва.

Історична еволюція промислових революцій таким чином демонструє послідовний зсув джерел конкурентних переваг від фізичних ресурсів і механічної потужності до здатності управляти складними, даноцентричними виробничими системами. Перша та друга революції заклали виробничу, енергетичну та інфраструктурну базу індустріального суспільства; третя забезпечила цифрову автоматизацію та глобалізацію ланцюгів створення вартості; четверта створює можливості для повної інтеграції фізичних і цифрових компонентів виробництва та формування сервісно орієнтованих бізнес-моделей. На цьому історичному фундаменті постає концепція «розумних фабрик» як наступного етапу розвитку промислових систем, у межах якого цифрові технології виступають ядром нової архітектури виробництва й засобом підвищення міжнародної конкурентоспроможності.

1.2 Цифрові технології як основа функціонування та розвитку «розумних фабрик»

Системне функціонування та еволюційний розвиток «розумних фабрик» ґрунтуються не на окремих цифрових рішеннях, а на цілісній архітектурі, у центрі якої перебувають дані. У такій архітектурі виробничі активи, люди, цифрові моделі та бізнес-процеси з'єднані єдиним контуром «дані → аналітика й моделі → управлінські рішення → дії → нові дані». Саме замкнений характер цього контуру забезпечує прозорість та простежуваність операцій, своєчасне виявлення відхилень, адаптивність виробництва до змін попиту й зовнішнього середовища, а також накопичення знань, необхідних для розвитку інноваційних бізнес-моделей на базі «розумних фабрик» [7].

У цій роботі під «розумною фабрикою» розуміємо високотехнологічне виробниче підприємство, в якому на основі кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, цифрових двійників та засобів аналітики даних і штучного інтелекту забезпечується безперервний збір і обробка даних у реальному часі, самооптимізація процесів та інтеграція фізичних і цифрових потоків по всьому ланцюгу створення вартості. Ключовими ознаками «розумної фабрики» є високий рівень автономізації прийняття рішень, гнучка переналагоджуваність виробництва, прозорість стану обладнання й продукції протягом усього життєвого циклу, а також вбудовані механізми ресурсоефективності та екологічної стійкості. Саме в такому розумінні «розумні фабрики» виступають базовою організаційною формою реалізації парадигми Індустрії 4.0 у сфері міжнародного виробництва [8; 9].

На відміну від логіки Індустрії 3.0, де цифровізація здебільшого зводилася до фрагментарної автоматизації окремих ділянок або ліній, «розумні фабрики» спираються на інтегроване використання інформаційно-комунікаційних технологій на всіх рівнях виробничої системи. ІКТ тут виконують не допоміжну, а системоутворюючу функцію: вони пов'язують між собою обладнання, програмне забезпечення, персонал і зовнішніх контрагентів у єдину соціотехнічну систему. Кібер-фізичні системи, промислові мережі передачі даних та стандартизовані інтерфейси дають змогу перетворювати фізичні процеси на керовані цифрові потоки, а отже – будувати виробничі моделі, орієнтовані на дані та постійне навчання [10].

Узгоджена архітектура «розумної фабрики» зазвичай включає кілька взаємопов'язаних рівнів. На фізичному рівні розміщене обладнання, транспортні системи, логістична інфраструктура та системи енергопостачання. Над ним формується рівень збору даних і промислового Інтернету речей, що забезпечує безперервний моніторинг стану машин, параметрів технологічних процесів, споживання ресурсів і показників якості. Далі йдуть рівні керування виробничими операціями (системи диспетчеризації та управління виробництвом), бізнес-рівень (системи управління ланцюгами постачання,

фінансами, персоналом) і, нарешті, платформи аналітики, штучного інтелекту й цифрових двійників, які синхронізують інженерно-технологічні рішення з оперативними даними з виробництва [8]. На рис. 1.2 подано архітектуру «розумної фабрики», яка відображає ключові компоненти та взаємозв'язки між ними.

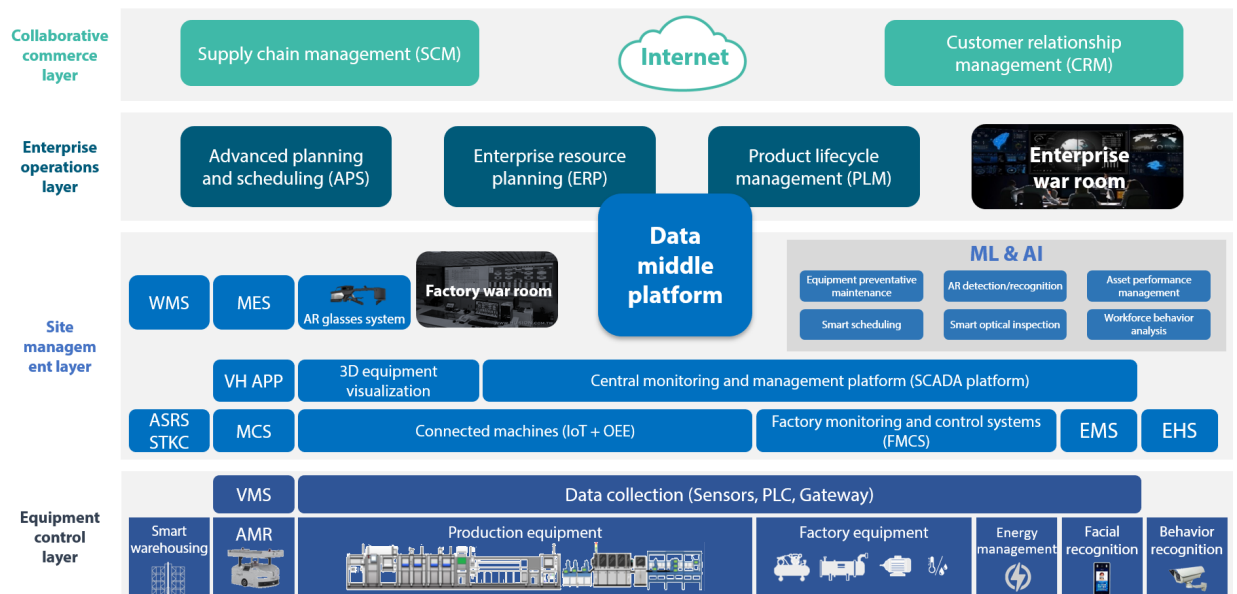


Рисунок 1.2 - Архітектура «розумної фабрики»*

*Джерело: [19]

Саме промисловий Інтернет речей і сенсорика забезпечують базову видимість процесів для «розумної фабрики». Устаткування оснащується датчиками вібрації, температури, тиску, витрат, електроспоживання, положення та навантаження; збираються дані про параметри зварювання, стан інструменту, якість швів, геометричні допуски тощо. Ці сигнали передаються через промислові мережі до контролерів та систем операційного рівня, де агрегуються і перетворюються на цифрові події. На основі таких даних стає можливим відстеження походження продукції, управління енергоспоживанням, точне виявлення «вузьких місць» у процесах, впровадження прогностичного технічного обслуговування (PdM) і покращення показників загальної ефективності обладнання (OEE). Дослідження мережі Global Lighthouse Network свідчать, що саме зв'язка ІоТ, візуалізації споживання ресурсів та аналітики в реальному часі

забезпечує одночасне покращення економічних та екологічних ключових показників ефективності на підприємствах-лідерах [7].

Наступний критичний елемент – аналітика даних і штучний інтелект, які перетворюють масиви телеметрії на практичні управлінські рішення. На рівні цеху й заводу використовуються моделі, що прогнозують відмови обладнання, оцінюють ризики браку, рекомендують оптимальні режими роботи ліній і обладнання, допомагають формувати більш стійкі графіки планування виробництва та технічного обслуговування. На більш високому рівні аналітика дозволяє моделювати варіанти завантаження потужностей, порівнювати сценарії «виробляти чи закуповувати», оптимізувати структуру продуктового портфеля та ланцюгів постачання. Впровадження таких рішень вимагає не лише алгоритмів, а й зрілих процесів управління життєвим циклом моделей (визначення, оновлення, моніторинг якості та стійкості моделей), що є важливою умовою масштабованості цифрової трансформації [11; 8].

Цифрова аналітика водночас змінює підходи до вимірювання результативності виробництва. «Розумні фабрики» переходять від обмеженого набору показників, що фіксуються періодично, до системи багатовимірних ключових показників ефективності (KPI), які оновлюються в режимі, наближеному до реального часу. До традиційних метрик продуктивності, як-от випуск на одиницю часу, показників загальної ефективності обладнання чи собівартість, додаються показники гнучкості (час переналагодження, time-to-market, частка кастомізованих замовлень), якості (частка браку, кількість рекламаций, показники стабільності процесів), енергоефективності та екологічної результативності (споживання енергії на одиницю продукції, викиди, утилізація відходів), а також безпеки праці. Завдяки цифровим платформам ці показники можуть агрегуватися на рівні цеху, заводу, бізнес-одиниці й усього холдингу, що створює інформаційну основу для прийняття стратегічних рішень щодо модернізації, інвестування та розвитку «розумних фабрик».

Цифрова аналітика поступово виходить за межі окремого заводу та охоплює всю мережу створення вартості. Платформи управління ланцюгами постачання інтегрують дані від постачальників сировини, логістичних операторів, дистриб'юторів і кінцевих споживачів, формуючи наскрізне бачення попиту й пропозиції. Це дозволяє «розумним фабрикам» синхронізувати виробничі плани з реальними коливаннями ринку, скорочувати запаси, знижувати рівень дефіциту та надлишків, оптимізувати транспортні схеми й вуглецевий слід постачань. Аналітичні інструменти підтримують сценарне планування, оцінку ризиків зривів поставок, моделювання альтернативних маршрутів і постачальників, що безпосередньо впливає на резильєнтність і конкурентоспроможність компаній у глобальних ланцюгах створення вартості [12].

Важливою зв'язувальною ланкою між фізичним і цифровим середовищем «розумних фабрик» є концепція цифрових двійників. Цифровий двійник – це віртуальне подання виробу, технологічного процесу, лінії або навіть усього заводу, яке постійно синхронізується з даними з реального середовища. Він дозволяє об'єднати дані з етапів проєктування, виробництва та експлуатації, проганяти сценарії «що, якщо?» до фактичного впровадження змін, оцінювати наслідки припущень щодо режимів роботи, конфігурації ліній чи змін у рецептурах. Міжнародні стандарти, зокрема ISO 23247, задають еталонні підходи до побудови цифрових двійників у виробництві, визначаючи сутності, потоки даних і ролі учасників, що дозволяє уніфікувати рішення різних постачальників і пришвидшувати їх інтеграцію [13; 14]. На практиці саме цифровий двійник виступає «каркасом знань» «розумної фабрики», оскільки структурує інформацію про активи, процеси та показники ефективності, роблячи її придатною для повторного використання та масштабування.

Цифрові двійники тісно пов'язані з роботизацією та автономними системами. На «розумних фабриках» використовуються промислові роботи, кооперативні роботи (cobots), автономні мобільні платформи для внутрішньозаводської логістики, автоматизовані системи складування тощо.

Їхня цінність не обмежується заміною ручної праці; інтеграція роботів у загальний цифровий контур дозволяє гнучко переналаштовувати виробничі лінії під короткі серії, кастомізовані замовлення, нові конфігурації продукту без значних втрат продуктивності. Коли рух роботів і графіки їх роботи узгоджені з даними з цифрового двійника, планами виробництва та системами управління запасами, роботизація перетворюється з локальної ініціативи на інструмент стратегічної гнучкості підприємства [8].

Не менш важливим елементом цифрової основи є сучасні інтерфейси взаємодії «людина – машина» та технології доповненої і віртуальної реальності (AR/VR). Вони забезпечують відображення критичної інформації у зручному для оператора форматі, підтримують покрокові інструкції, дозволяють залучати віддалених експертів до супроводу складних операцій, скорочують час навчання персоналу та зменшують імовірність помилок. У межах концепції Industry 5.0 ці рішення розглядаються як основа людиноцентричності: технології мають підвищувати безпеку, комфорт і продуктивність працівників, а не витіснити людину з виробничих процесів [15]. Саме така конфігурація є критичною для сталого розвитку «розумних фабрик», де цифрові системи посилюють компетенції персоналу, а не замінюють їх.

Функціонування цифрових технологій на «розумних фабриках» неможливе без потужної інфраструктури обчислень і зберігання даних. Поєднання периферійних та хмарних обчислень дозволяє одночасно забезпечити низьку затримку для критичних операцій керування та масштабовані ресурси для історичної аналітики й навчання моделей. На рівні цеху периферійні вузли обробляють телеметрію в реальному часі, виконують локальні алгоритми керування, фільтрують і агрегують дані для передавання у центральні сховища. Хмарні або дата-центрові рішення формують єдине середовище для зберігання та аналізу даних з різних майданчиків, підтримують централізовану аналітику, моделювання та координацію рішень на рівні виробничого холдингу чи глобальної мережі підприємств [12]. Основний набір цифрових технологій, що

використовуються в індустрії «розумних фабрик», узагальнено в табл. А. 1 (див. додаток А).

Ефективність такої інфраструктури значною мірою визначається якістю архітектури даних і ступенем стандартизації. «Розумні фабрики» впроваджують єдині моделі даних для обладнання, процесів, продуктів і показників ефективності, узгоджують довідники, календарі, маршрути, правила обліку операцій і витрат. Стандартизація дозволяє забезпечити сумісність між системами різних постачальників, спрощує інтеграцію нових модулів, знижує транзакційні витрати масштабування цифрових рішень у межах підприємства й між майданчиками [13]. На рівні кібербезпеки використовуються підходи, закріплені у профільних стандартах і рекомендаціях (зокрема серія ІЕС 62443 та національні/міжнародні рамки управління кіберризиками для промислових систем), які передбачають сегментацію мереж, управління доступом, моніторинг аномалій і забезпечення безпеки життєвого циклу компонентів [16; 17].

Ключовою умовою розвитку «розумних фабрик» є також інституційні й організаційні зміни, що супроводжують впровадження цифрових технологій. На підприємствах формуються кросфункціональні команди, які поєднують фахівців з виробництва, інформаційних технологій, аналізу даних, кібербезпеки та управління змінами. Виникають центри компетенцій, відповідальні за стандарти, методики та повторне використання рішень; у систему управління інтегруються процеси роботи з даними (ідентифікація джерел, забезпечення якості, опис і каталогізація, розподіл прав доступу). Дослідження організаційних трансформацій показують, що саме людський капітал, рівень цифрової грамотності та готовність до міждисциплінарної взаємодії визначають темпи і глибину переходу до моделей «розумної фабрики» [18; 8].

Загалом цифрові технології виступають не лише «технічною основою» функціонування «розумних фабрик», але й ключовим драйвером їх подальшого розвитку. З одного боку, вони забезпечують стабільну роботу виробничих систем, високий рівень ефективності, якості, гнучкості та енергоощадності, що прямо впливає на операційні витрати й конкурентоспроможність підприємств. З

іншого боку, наявність зрілої цифрової архітектури створює базу для інноваційних бізнес-моделей — переходу до сервісних форматів «продукт-як-послуга», участі в промислових платформах, інтеграції в глобальні ланцюги створення вартості з високою доданою вартістю. Накопичення історичних масивів даних і напрацьованих алгоритмів дає змогу формувати так звані динамічні здібності підприємств: здатність швидко переорієнтовуватися між сегментами ринку, запускати нові продукти, адаптувати виробничі лінії до змін регуляторних вимог чи ресурсних обмежень. Саме тому цифрові технології розглядаються в сучасній літературі як системоутворюючий фактор «розумних фабрик», який з'єднує технічний, організаційний та економічний виміри їх розвитку [8].

1.3 «Розумні фабрики» як елемент глобальної конкурентоспроможності країн і компаній

Сформована в попередніх підрозділах логіка розвитку індустріальних революцій і цифрових технологій дає змогу розглядати «розумні фабрики» не лише як внутрішню інновацію окремого підприємства, а як структурний елемент глобальної системи конкурентоспроможності. У сучасній економіці переваги країн і компаній дедалі менше ґрунтуються на дешевих ресурсах чи окремих організаційних новаціях і дедалі більше — на здатності інтегрувати цифрові технології в виробничі та бізнес-процеси, формуючи високопродуктивні, гнучкі й стійкі виробничі системи. «Розумні фабрики» є одним з ключових механізмів реалізації цієї здатності, оскільки поєднують технологічні рішення, організаційні практики та інституційні умови в єдину архітектуру створення вартості. У цьому контексті «розумна фабрика» може розглядатися як конкретна організаційно-технологічна форма втілення парадигми Індустрії 4.0, у якій конкурентоспроможність задається не окремими автоматизованими лініями, а цілісністю цифрової екосистеми виробництва.

На рівні підприємства «розумні фабрики» змінюють саму природу традиційних конкурентних переваг. Класична триєдина мета виробництва – собівартість, якість, термін виконання – у цифровому середовищі доповнюється вимогами до гнучкості, масової кастомізації, простежуваності й енергоефективності. Завдяки наскрізним потокам даних, інтеграції кібер-фізичних систем, промислового Інтернету речей і аналітики реального часу підприємства отримують змогу одночасно підвищувати загальну ефективність устаткування, скорочувати простої, зменшувати брак і втрати ресурсів, пришвидшувати виведення нових продуктів на ринок. Аналітичні огляди мережі Global Lighthouse Network показують, що підприємства-«маяки», які впровадили повномасштабні рішення четвертої промислової революції, досягають суттєвих покращень ключових операційних показників – від показників загальної ефективності обладнання і продуктивності праці до енергоємності та вуглецевої інтенсивності продукції [7; 21].

У таких умовах конкуренція між виробниками зміщується від суто цінової до багатовимірної – за швидкість адаптації до запитів клієнтів, здатність пропонувати індивідуалізовані рішення, рівень сервісу й прозорість взаємодії в ланцюгах постачання. «Розумні фабрики» забезпечують технічну основу для масового виробництва з високим рівнем кастомізації: конфігурація продукту може змінюватися майже в реальному часі без радикальних втрат продуктивності, а інформація про виконання замовлення, спожиті ресурси й параметри якості стає доступною для клієнтів і партнерів у цифровому форматі. Це посилює диференціацію компаній, які інвестують у цифрову трансформацію, створює вищі бар'єри входу для конкурентів, що зберігають традиційні моделі організації виробництва, і водночас підвищує чутливість ринку до стандартів якості та стійкості.

Цифровізація виробництва через «розумні фабрики» трансформує також інноваційний вимір конкурентоспроможності. Наявність єдиного цифрового ланцюжка від етапу проєктування до сервісу (digital thread) дає можливість швидко тестувати нові конструкції, рецептури та режими роботи на основі

цифрових двійників, моделювати «що-якщо»-сценарії, зменшувати кількість фізичних прототипів і прискорювати цикли виведення інноваційних продуктів на ринок. Дані, які накопичуються в процесі експлуатації виробів і роботи виробничих ліній, стають основою для безперервного удосконалення конструкції та процесів, а також для формування сервісних моделей обслуговування – від прогностного ремонту до контрактів типу «продукт-як-послуга». У такій логіці «розумна фабрика» перетворюється на платформу для експериментування з новими бізнес-моделями й каналами монетизації інновацій.

Не менш значущим є вплив «розумних фабрик» на структуру витрат і капіталу підприємства. По-перше, цифрові рішення дозволяють зменшувати змінні витрати за рахунок оптимізації режимів роботи устаткування, зниження браку, втрат енергії та матеріалів, оптимізації логістики. По-друге, вони дають змогу ефективніше використовувати основний капітал через подовження життєвого циклу обладнання, підвищення коефіцієнта завантаження, переходу від планово-попереджувальних до стан-орієнтованих ремонтів. По-третє, «розумні фабрики» формують нову структуру нематеріальних активів – дані, алгоритми, моделі, стандартизовані процеси – які стають джерелом стійких конкурентних переваг і можуть масштабуватися між підрозділами, заводами та країнами присутності.

Окремий вимір – кадровий та організаційний. Функціонування «розумної фабрики» потребує не лише інвестицій у обладнання та програмні рішення, а й формування нових компетенцій і організаційних практик. Команди мають вміти працювати з даними, інтерпретувати результати аналітики, взаємодіяти з інтелектуальними системами управління, дотримуючись вимог кібербезпеки та промислової безпеки. Це стимулює перехід від ієрархічних структур до більш гнучких, кросфункціональних команд, зорієнтованих на вирішення конкретних продуктово-процесних задач. Компанії, які успішно поєднують технологічні інвестиції з розвитком організаційних і людських ресурсів, отримують не лише короткострокові ефекти від оптимізації, а й довгострокові динамічні здібності –

здатність швидко адаптуватися до змін попиту, регуляторних вимог і технологічних трендів.

На макрорівні поширення «розумних фабрик» стає індикатором розвитку сучасної промислової бази та потенціалу участі країни в сегментах глобальних ланцюгів створення вартості з високою доданою вартістю. Міжнародні дослідження ЮНІДО, зокрема останні доповіді про промисловий розвиток, показують, що країни з високою цифровою інтенсивністю промисловості демонструють стійкіші траєкторії зростання продуктивності, кращу диверсифікацію експорту та вищу стійкість до зовнішніх шоків [22]. Ці ефекти пов'язані не лише з модернізацією окремих підприємств, а й із формуванням інноваційних промислових екосистем – кластерів, у яких взаємодіють виробники, постачальники технологій, наукові установи, сервісні й фінансові організації.

Позиції країн у глобальній конкуренції дедалі частіше оцінюються з урахуванням їх готовності до майбутнього виробництва – здатності поєднувати технологічну зрілість, інфраструктурну забезпеченість, людський капітал та інституційну спроможність реалізовувати комплексні промислові стратегії. Аналітика Всесвітнього економічного форуму та партнерів свідчить, що країни, які інтенсивно впроваджують технології «розумних фабрик» і підтримують розвиток відповідних екосистем, отримують переваги не лише за показниками продуктивності, а й за параметрами стійкості ланцюгів постачання, інноваційної активності та експортної складності [23; 24]. Ідеться про поєднання декількох груп чинників: наявності технологічних лідерів, здатних масштабувати передові практики; розвиненої цифрової та транспортної інфраструктури; системи освіти й професійної підготовки, що забезпечує кадрами промислову трансформацію; прозорого регуляторного середовища, яке підтримує інвестиції в інновації та конкуренцію на ринках.

На рівні транснаціональних корпорацій «розумні фабрики» стають інструментом тонкого налаштування глобальної виробничої мережі. Компанії можуть комбінувати різні майданчики залежно від їх функцій у ланцюгу

створення вартості: одні заводи спеціалізуються на дослідно-промислових партіях і швидкому виведенні нових продуктів, інші – на масштабованому серійному виробництві, ще інші – на виконанні сервісних функцій, збиранні даних про експлуатацію й зворотному зв'язку з ринком. Єдина цифрова архітектура дає змогу координувати ці ролі, швидко перерозподіляти замовлення між майданчиками, реагувати на локальні збурення (логістичні проблеми, зміни регуляцій, енергетичні кризи) і водночас зберігати цілісність стандартів якості та безпеки. Такі можливості посилюють привабливість країн, що пропонують сприятливі умови для розміщення «розумних» виробництв, у боротьбі за прямі іноземні інвестиції.

З іншого боку, показники, які фіксують поширення «розумних фабрик» та інтенсивність цифровізації промисловості, дедалі частіше інтегруються в системи міжнародних порівнянь продуктивності, цифрового розвитку й конкурентоспроможності. Звіти ОЕСР щодо продуктивності та доповіді міжнародних фінансових організацій про цифровий прогрес демонструють, що саме взаємодія між інвестиціями в основний капітал і нематеріальними активами (дані, програмне забезпечення, організаційні інновації) визначає динаміку сукупної факторної продуктивності в промисловості [25; 20]. Таким чином, «розумні фабрики» постають не лише як сукупність передового обладнання, а як прояв глибшої трансформації структури капіталу й знань, яку можна вимірювати й порівнювати на міжнародному рівні.

Водночас країни, які зберігають фрагментарний характер цифровізації промисловості, ризикують опинитися в «цифровій пастці» – коли модернізація обмежується окремими пілотними проектами й не переростає в системну зміну промислової структури. Для них актуальною стає проблема подвійного розриву: відставання як у технологічному вимірі (обмежена кількість «розумних фабрик», низька поширеність цифрових рішень у малому та середньому бізнесі), так і в інституційному (недостатня узгодженість промислової, інноваційної, освітньої та регіональної політик). Вирішення цього завдання потребує цілеспрямованих стратегій «наздоганяючої» індустріалізації на основі цифрових технологій,

орієнтованих на створення критичної маси модернізованих виробництв, розвиток кластерів і підвищення спроможності підприємств інтегруватися в глобальні ланцюги створення вартості.

«Розумні фабрики» відіграють помітну роль і в досягненні цілей кліматичної та енергетичної політики. Промисловість належить до найбільш енергоємних і вуглецево інтенсивних секторів економіки, тому можливість одночасно підвищувати продуктивність і скорочувати викиди парникових газів стає ключовим фактором конкурентоспроможності на світових ринках, де посилюється регулювання вуглецевого сліду продукції. Цифрові системи моніторингу, оптимізації режимів споживання енергії, управління навантаженнями, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії у виробничу інфраструктуру дозволяють підприємствам досягати значних економій енергоресурсів і відповідати вимогам «зеленої» торгівлі [26; 27]. Для країн це означає зміцнення позицій у глобальних ланцюгах вартості, чутливих до екологічних критеріїв, і можливість залучення інвестицій у «зелену» індустріалізацію.

Важливо підкреслити, що вплив «розумних фабрик» на конкурентоспроможність країн і компаній не є автоматичним. Ті самі технології можуть привести до різних результатів залежно від інституційного середовища, структури власності, якості регуляторної політики, рівня розвитку ринку праці та системи освіти. За відсутності належних умов цифровізація виробництва може супроводжуватися посиленням соціально-економічної поляризації, витісненням малих і середніх підприємств, домінуванням кількох глобальних платформ, які концентрують дані й ринкову владу. Тому в міжнародній практиці дедалі більшого значення набувають комплексні промислові стратегії, що поєднують технологічну, освітню, регуляторну та регіональну політики й орієнтовані на інклюзивний характер цифрової трансформації промисловості.

Основні канали впливу «розумних фабрик» на конкурентоспроможність підприємств і національних економік – через продуктивність, інноваційність, інтеграцію в глобальні ланцюги створення вартості, енергетичну та екологічну

ефективність, розвиток людського капіталу й інституційної спроможності – узагальнені в табл. Б. 1 (див. додаток Б).

З огляду на наведені аргументи, «розумні фабрики» доцільно розглядати як вузлову ланку, через яку перетинаються мікрорівневі процеси підвищення ефективності та інноваційності підприємств і макрорівневі завдання структурної модернізації та зростання міжнародної конкурентоспроможності країн. На мікрорівні вони формують підґрунтя для компаній-лідерів, здатних встановлювати стандарти якості, гнучкості та екологічності в глобальних ланцюгах створення вартості. На мезорівні – виступають ядром індустріальних кластерів і регіональних інноваційних екосистем, де концентруються високотехнологічні робочі місця, інвестиції та результати НДДКР. На макрорівні – сприяють зміщенню структури економіки в бік більш технологічно складних і капіталомістких сегментів, посилюючи позиції країни в глобальній ієрархії поділу праці.

У подальших розділах для оцінювання впливу «розумних фабрик» на конкурентоспроможність міжнародного бізнесу застосовано системний, інституційний та порівняльний підходи. Емпіричну базу дослідження становлять методи економіко-статистичного аналізу (оцінювання динаміки та структури показників роботизації, цифровізації та енергоємності виробництва), порівняльний аналіз країн і компаній у глобальних ланцюгах створення вартості, а також метод кейс-стаді кращих міжнародних практик «розумних фабрик» на основі матеріалів Global Lighthouse Network і корпоративної звітності провідних виробничих корпорацій.

2 АНАЛІЗ СВІТОВОГО ДОСВІДУ У ВПРОВАДЖЕННІ «РОЗУМНИХ ФАБРИК»

2.1 Глобальні драйвери та бар'єри впровадження «розумних фабрик»

Сучасний етап розвитку світової економіки характеризується поєднанням кількох довгострокових трендів: уповільнення зростання продуктивності в розвинених країнах, посилення конкуренції за участь у глобальних ланцюгах створення вартості, кліматичні виклики та ускладнення геополітичного середовища. На цьому тлі «розумні фабрики» розглядаються як один з ключових інструментів промислової трансформації: вони дають можливість одночасно підвищувати ефективність виробництва, гнучкість, якість, стійкість до шоків і екологічні показники. Разом з тим поширення «розумних фабрик» має нерівномірний характер і супроводжується суттєвими фінансовими, організаційними, технологічними та інституційними бар'єрами, що зумовлює потребу у ґрунтовному аналізі глобальних драйверів і перешкод їх впровадження.

На макрорівні одним із головних драйверів є потреба в нових джерелах зростання продуктивності праці та капіталу. Аналітичні дослідження ЮНІДО та інших міжнародних організацій показують, що традиційні фактори індустріального розвитку (масштаб, дешевизна праці, розширення ринків) вичерпують свій потенціал, а цифрові технології та «розумні фабрики» стають ключовим каналом для підвищення сукупної факторної продуктивності, диверсифікації виробництва й формування секторів з високою доданою вартістю [22; 25]. У доповідях Всесвітнього економічного форуму і партнерів на основі вибірки підприємств-учасників Global Lighthouse Network показано, що системне застосування технологій четвертої промислової революції забезпечує, у середньому, близько 40 % підвищення продуктивності праці й скорочення виробничих циклів майже наполовину, одночасно покращуючи показники якості та енергоефективності [21]. Такі результати демонструють, що «розумні

фабрики» не є лише технологічним трендом, а дають відчутні економічні вигоди, які прямо транслиуються в конкурентоспроможність компаній і країн.

Ще одним важливим драйвером є економічний ефект від масштабного поширення «розумних фабрик» у глобальному масштабі. За оцінками Capgemini Research Institute, реалізація потенціалу смарт-виробництва може додати світовій економіці щонайменше 1,4–1,5 трлн. дол. США протягом першої половини 2020-х років за рахунок підвищення продуктивності, скорочення витрат, зменшення браку й енергоємності, а також появи нових бізнес-моделей у промисловості. Дослідження на основі опитування понад 1000 промислових компаній у різних країнах показують, що частка виробників, які мали активні проєкти «розумних фабрик», зросла з близько 40 % у 2017 р. до понад 60–70 % уже до 2019 р., що свідчить про перехід від поодиноких експериментів до масового формування портфеля ініціатив у цій сфері [8]. Для урядів це означає, що «розумні фабрики» стають не лише внутрішньою справою компаній, а й об'єктом промислової політики, орієнтованої на збереження або зміцнення позицій у глобальній конкуренції.

На мікрорівні підприємств провідними драйверами виступають прагнення знизити операційні витрати, поліпшити якість і гнучкість виробництва, прискорити виведення нових продуктів на ринок. Цифрові платформи управління виробництвом, промисловий Інтернет речей, аналітика даних і штучний інтелект дозволяють переходити від реактивного до превентивного управління: прогнозувати відмови обладнання, оптимізувати режими роботи ліній, скорочувати втрати часу на переналагодження, забезпечувати стабільність процесів, що напряду відображається на витратах і доходах підприємства. Публікації в рамках Global Lighthouse Network фіксують випадки, коли завдяки комплексним рішенням «розумної фабрики» підприємства досягали двозначних (у відсотках) покращень одночасно за показниками собівартості, продуктивності, часу виконання замовлень і енергоспоживання [7; 21]. Це формує для компаній чіткі економічні стимули до цифрової модернізації навіть в умовах підвищеної невизначеності.

Суттєвим драйвером є також посилення вимог до гнучкості та кастомізації. Глобальні ланцюги створення вартості дедалі частіше орієнтуються на скорочення серій, індивідуалізацію продуктів, інтеграцію послуг у товарні пропозиції. «Розумні фабрики» завдяки цифровим двійникам, модульним виробничим лініям та гнучкому плануванню дозволяють поєднати ефекти масштабного виробництва з високим рівнем індивідуалізації – тобто формують спроможність до масової кастомізації. Це розширює можливості для диференціації продукції, виходу в преміальні сегменти ринку та зміцнення бренду, що прямо впливає на конкурентоспроможність компаній у глобальній конкуренції [8; 12].

Важливим набором драйверів є екологічні та енергетичні чинники. Підвищення цін на енергоносії, запровадження вуглецевого регулювання й механізмів на кшталт вуглецевого коригування імпорту, жорсткіші екологічні стандарти з боку споживачів і регуляторів змушують промислові компанії шукати способи одночасно підвищувати ефективність і скорочувати викиди. Дослідження та профільні роботи щодо енергоефективності «розумних фабрик» підтверджують, що інтеграція сенсорики, промислового Інтернету речей, аналітики даних і периферійних обчислень дозволяє досягати відчутного зниження енергоємності продукції, покращення керованості енергоспоживання та скорочення викидів без втрати продуктивності [26; 27]. Для країн це означає можливість поєднати завдання промислового розвитку з цілями «зеленої» трансформації, що підсилює мотивацію до поширення «розумних фабрик» у рамках кліматичної та промислової політики.

До глобальних драйверів належить і посилення уваги до стійкості ланцюгів постачання. Пандемія COVID-19, геополітична напруга, перебої в енергопостачанні оголили вразливість традиційних моделей «точно вчасно» та надмірної залежності від обмеженої кількості постачальників і регіонів. «Розумні фабрики», інтегровані в цифрові платформи управління ланцюгами створення вартості, забезпечують кращу прозорість щодо стану запасів, завантаження потужностей, статусу поставок, дозволяють швидко

перебудовувати виробничі плани й маршрути постачання. Саме поєднання підвищення продуктивності, стійкості та прозорості відзначається в аналітиці Global Lighthouse Network як ключова комбінація, що дозволяє компаніям-«маякам» краще долати глобальні потрясіння. Ключові мотиваційні чинники впровадження технологій «розумних фабрик» на рівні підприємств і національних економік узагальнено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Ключові драйвери впровадження «розумних фабрик» на рівні підприємств і національних економік*

Група чинників	Рівень підприємства: ключові драйвери	Рівень національної економіки: ключові драйвери
Економічна ефективність і продуктивність	Зниження собівартості продукції; підвищення продуктивності праці та завантаження обладнання; скорочення простоїв і браку.	Зростання продуктивності праці та сукупної факторної продуктивності; модернізація основного капіталу; підвищення конкурентоспроможності експорту.
Гнучкість, інноваційність і кастомізація	Скорочення циклу виведення нових продуктів на ринок; масова кастомізація; використання цифрових двійників і даних експлуатації для вдосконалення продукції.	Посилення ролі країни в глобальних ланцюгах створення вартості за рахунок високотехнологічного та інноваційного експорту; розвиток національних інноваційних кластерів.
Екологічні та енергетичні вимоги	Зменшення енергоємності та матеріаломісткості продукції; відповідність вимогам клієнтів щодо «зеленої» продукції; скорочення витрат на енергію й відходи.	Виконання міжнародних кліматичних зобов'язань; зниження енергоємності ВВП; зміцнення позицій у «зелених» ланцюгах постачання.
Стійкість ланцюгів постачання та інтеграція в глобальну економіку	Підвищення прозорості й керованості ланцюгів постачання; швидке переналаштування виробничих планів; диверсифікація постачальників і ринків збуту.	Зміцнення позицій країни в глобальних ланцюгах створення вартості; залучення прямих іноземних інвестицій у високотехнологічне виробництво.
Людський капітал і організаційні компетенції	Зростання продуктивності праці завдяки цифровим інструментам підтримки рішень; підвищення безпеки та привабливості робочих місць; розвиток міждисциплінарних компетенцій.	Формування національної бази кадрів для цифрової індустріалізації; модернізація системи професійної освіти й підготовки кадрів.

Група чинників	Рівень підприємства: ключові драйвери	Рівень національної економіки: ключові драйвери
Інституційні та інфраструктурні умови	Запровадження внутрішніх стандартів управління даними, якістю й кібербезпекою; створення центрів компетенцій і кросфункціональних команд; узгодження ІТ- та виробничих стратегій.	Наявність національних стратегій цифрової трансформації промисловості; розвиток цифрової та енергетичної інфраструктури; програми підтримки малих і середніх підприємств у сфері цифровізації.

*Джерело: складено автором за [7; 8]

Разом із тим розгортання «розумних фабрик» стикається з низкою системних бар'єрів. На рівні підприємств одним з найпоширеніших є фінансові обмеження та складність обґрунтування рентабельності інвестицій (ROI).

Опитування McKinsey понад 800 промислових компаній показало, що для більшості з них ключовими перешкодами впровадження технологій Індустрії 4.0 є високі стартові витрати, конкуренція за капітал із традиційними проєктами, а також невизначеність щодо очікуваних ефектів [28]. У ряді випадків ініціативи цифрової трансформації стартують як «пілоти», але не масштабуються, оскільки компанії не мають чітких критеріїв оцінки ROI, не пов'язують цифрові рішення з конкретними бізнес-показниками. Це формує так званий «пастку пілотних проєктів», коли організації накопичують окремі експерименти без системного впливу на конкурентоспроможність.

Серйозним бар'єром є дефіцит кваліфікованих кадрів і організаційні проблеми. Практика показує, що впровадження «розумних фабрик» потребує не лише інженерів-автоматників, а й фахівців з аналізу даних, кібербезпеки, розробників програмного забезпечення, а також працівників виробництва з новим набором цифрових компетенцій. Дослідження Capgemini Research Institute та інші огляди наголошують, що одна з двох головних перешкод для масштабування «розумних фабрик» – це саме дефіцит цифрових талантів, здатних забезпечити конвергенцію інформаційних та операційних технологій і працювати у кросфункціональних командах [8]. Аналогічні висновки містять дослідження, присвячені бар'єрам цифровізації промисловості: вони відзначають, що брак навичок, опір змінам, внутрішні конфлікти між

підрозділами й слабе лідерство часто виявляються важливішими перешкодами, ніж власне технічні питання [18].

До організаційних бар'єрів належать також недостатня інтегрованість стратегій цифрової трансформації у загальну бізнес-стратегію, фрагментованість ініціатив, відсутність єдиної архітектури даних. У багатьох компаніях проекти в галузі Індустрії 4.0 стартують на рівні окремих цехів або функцій, без належної координації з боку вищого керівництва. Це призводить до виникнення розрізнених «цифрових островців», несумісних рішень різних постачальників, дублювання інвестицій і, врешті-решт, до розчарування в результатах. Аналітичні звіти зазначають, що без чіткої дорожньої карти, узгодженої з бізнес-цілями, компанії ризикують вкладати ресурси в проекти, які не створюють системної доданої вартості, а отже посилюють скепсис щодо доцільності «розумних фабрик» як таких [11].

Суттєву групу бар'єрів становлять технологічні та інфраструктурні обмеження. По-перше, багато промислових підприємств мають значний парк застарілого обладнання, яке не підтримує сучасні стандарти підключення й збору даних; його модернізація або заміна потребує значних капіталовкладень. По-друге, виникають проблеми із сумісністю між різними системами керування, платформами й протоколами, що ускладнює створення єдиного цифрового контуру. По-третє, для ряду країн і регіонів бар'єром є недостатня розвиненість цифрової інфраструктури – обмежена пропускна здатність мереж, нестабільність електропостачання, відсутність надійних дата-центрів. У наукових дослідженнях, присвячених перешкодам впровадженню Індустрії 4.0, підкреслюється, що проблеми стандартів, інфраструктури, кібербезпеки та інтеграції з наявними системами входять до переліку найважливіших бар'єрів поряд із кадровими та фінансовими [29].

Кібербезпека виступає окремим, але тісно пов'язаним бар'єром. Підключення виробничих систем до корпоративних мереж і зовнішніх сервісів, використання хмарних платформ та промислового Інтернету речей збільшує поверхню атаки для зловмисників. Інциденти в промислових системах можуть

мати не лише фінансові, а й безпекові наслідки, включно з пошкодженням обладнання та ризиками для життя й здоров'я працівників. Це змушує компанії інвестувати в комплексні рішення промислової кібербезпеки, впроваджувати стандарти та процедури управління ризиками, що, з одного боку, збільшує складність впровадження «розумних фабрик», а з іншого – підвищує довіру до таких систем [16; 17].

На рівні національних економік бар'єри пов'язані з нерівномірністю розподілу технологічних і фінансових ресурсів, а також із «цифровим розривом» між країнами. За даними ЮНІДО, лише обмежена група розвинених країн концентрує переважну більшість патентів і експорту, пов'язаних із передовими цифровими виробничими технологіями, тоді як більшість країн, що розвиваються, залишаються на периферії глобальної цифрової промислової системи [22]. Для них впровадження «розумних фабрик» ускладнюється браком інвестицій, доступного фінансування для підприємств, слабкістю інноваційної інфраструктури, відставанням системи освіти й професійної підготовки від потреб цифрової індустрії. Водночас саме для таких країн «розумні фабрики» можуть стати інструментом «наздоганяючої» індустріалізації, якщо буде забезпечено цілісну політику розвитку людського капіталу, інфраструктури та інституцій. Ключові бар'єри впровадження технологій «розумних фабрик» на рівні підприємств і національних економік узагальнено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні бар'єри впровадження «розумних фабрик» на рівні підприємств і національних економік*

Група чинників	Рівень підприємства: основні бар'єри	Рівень національної економіки: основні бар'єри
Економічна ефективність і продуктивність	Високі початкові капіталовкладення; складність обґрунтування рентабельності інвестицій; труднощі інтеграції нових рішень із застарілим обладнанням.	Обмежені інвестиційні ресурси; висока вартість капіталу; утруднений доступ малих і середніх підприємств до фінансування модернізації.
Гнучкість, інноваційність і кастомізація	Фрагментованість ІТ-ландшафту; дефіцит компетенцій з аналізу даних та управління цифровими	Недостатній розвиток національної інноваційної системи; слабкі мережі

Група чинників	Рівень підприємства: основні бар'єри	Рівень національної економіки: основні бар'єри
	платформами; організаційна інерція й опір змінам.	досліджень і розробок; обмежена підтримка пілотних проєктів і випробувальних полігонів.
Екологічні та енергетичні вимоги	Відсутність системного моніторингу споживання енергії; обмежені знання щодо енергоефективних рішень; додаткові витрати на екологічну модернізацію виробництва.	Повільна модернізація енергетичної інфраструктури; недосконалість екологічного регулювання та стимулів; ризики «вуглецевого» протекціонізму для експорту.
Стійкість ланцюгів постачання та інтеграція в глобальну економіку	Залежність від обмеженого кола ключових постачальників; складність інтеграції з цифровими платформами партнерів; недостатній обмін даними в ланцюгах постачання.	Периферійне положення в глобальних ланцюгах створення вартості; вразливість до зовнішніх шоків; збереження «цифрового розриву» між країнами [22].
Людський капітал і організаційні компетенції	Нестача фахівців з цифрових технологій та промислової автоматизації; значні витрати часу й ресурсів на перенавчання персоналу; опір змінам з боку частини працівників.	Відставання системи освіти й професійної підготовки від потреб цифрової індустрії; «витік мізків»; регіональні диспропорції у забезпеченні кадрами.
Інституційні та інфраструктурні умови	Розрізненість цифрових проєктів; відсутність єдиної архітектури даних; залежність від окремих постачальників технологій.	Фрагментованість регуляторної політики; слабка координація між відомствами; обмежені ресурси на підтримку промислової цифрової трансформації.

*Джерело: складено автором за [22; 16; 17]

Систематизуючи викладене, можна виокремити кілька груп глобальних драйверів упровадження «розумних фабрик» (підвищення продуктивності та ефективності, посилення гнучкості й інноваційності, екологічні та енергетичні вимоги, стійкість ланцюгів постачання, промислова політика) та відповідні групи бар'єрів (фінансові, кадрові, організаційні, технологічні, інституційні).

Таким чином, глобальний контекст розвитку «розумних фабрик» визначається напруженою взаємодією між потужними економічними й технологічними стимулами до їх впровадження та суттєвими бар'єрами, які сповільнюють або деформують цей процес. Країни й компанії, яким вдається перетворити драйвери на реальні програми цифрової трансформації, одночасно

вирішуючи проблеми кадрів, інфраструктури, стандартів і управління змінами, отримують відчутні переваги у продуктивності, інноваційності, екологічній результативності та стійкості. Подальший аналіз буде присвячено конкретним міжнародним практикам реалізації стратегій «розумних фабрик» та кількісному порівнянню рівня цифровізації виробництва в окремих провідних країнах, що дозволить поглибити розуміння як джерел конкурентних переваг, так і структурних обмежень на шляху до їх досягнення.

2.2 Кращі міжнародні практики: кейси Bosch, Siemens, Tesla, Foxconn, BMW

Аналіз кращих міжнародних практик дає змогу побачити, як концепція «розумних фабрик» переходить із теоретичної площини у конкретні організаційно-технологічні рішення. Для ілюстрації різних моделей впровадження були обрані п'ять компаній – Bosch, Siemens, Tesla, Foxconn та BMW. Вони репрезентують різні сегменти промисловості (машинобудування, електроніка, автомобілебудування, контрактне виробництво), різні стратегії цифрової трансформації та належать до країн, які є лідерами глобальної конкуренції у сфері промислового виробництва. Водночас усі ці компанії використовують спільний набір цифрових технологій – промисловий Інтернет речей, платформи збору та аналізу даних, штучний інтелект, цифрові двійники – але організують «розумні фабрики» по-різному залежно від бізнес-моделі й позиціонування на ринку.

На прикладі корпорації Bosch «розумні фабрики» виступають як ключовий інструмент одночасного підвищення ефективності та розвитку нового бізнесу в сфері цифрових промислових рішень. Компанія реалізує стратегію оцифрування й взаємного з'єднання близько 280 власних виробничих майданчиків по всьому світу, поєднуючи роль провайдера й користувача рішень Індустрії 4.0 [30]. Центральне місце посідає платформа Nexeed, яка інтегрує дані від десятків тисяч сенсорів, виробничого обладнання та логістичної інфраструктури й забезпечує

оптимізацію матеріальних потоків, технічне обслуговування, енергоменеджмент [30]. За даними Bosch, використання Nexeed на окремих заводах дозволило підвищити продуктивність приблизно на 25 %, зменшити витрати на технічне обслуговування на 30 % і досягти значного зменшення енерговитрат [30]. На заводі в Гамбурзі, наприклад, завдяки цифровому енергоменеджменту та оптимізації системи стисненого повітря споживання електроенергії скоротилося приблизно на 40 %, що супроводжувалося економією близько 800 тис. євро на рік [31]. Більш деталізовані переваги впровадження системи Nexeed представлені на рис. 2.1.

СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ	ДОСЯГНУТИЙ РЕЗУЛЬТАТ	ПОКАЗНИК
ВИРОБНИЦТВО (РІЗНІ ЗАВОДИ BOSCH)	ПІДВИЩЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ.	ДО 25%
ВИРОБНИЦТВО (ЗАВОД У БЛАЙХАХУ)	СКОРОЧЕННЯ ЗБОЇВ (ПРОСТОЇВ) В ОПЕРАЦІЯХ З ВИРОБНИЦТВА СИСТЕМ ESP.	НА 25%
ВИРОБНИЦТВО (РІЗНІ ЗАВОДИ BOSCH)	СКОРОЧЕННЯ СКЛАДСЬКИХ ЗАПАСІВ (ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ).	ДО 30%
ЛОГІСТИКА (ЗАВОД У ХОМБУРЗІ)	ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕЗЕНЬ MILK RUN (МАРШРУТИ ДОСТАВКИ КОМПОНЕНТІВ НА РОБОЧІ СТАНЦІЇ).	ДО 35%
ЛОГІСТИКА (ЗАВОД У ХОМБУРЗІ)	СКОРОЧЕННЯ ЧАСУ, НЕОБХІДНОГО ДЛЯ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАТУС МАТЕРІАЛЬНИХ ПОТОКІВ.	У 2 РАЗИ (НА 50%)
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ (ЗАВОД У ХОМБУРЗІ)	СКОРОЧЕННЯ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОДИНИЦЮ ПРОДУКЦІЇ.	НА 40%
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ (ЗАВОД У ХОМБУРЗІ)	РІЧНА ЕКОНОМІЯ ЗАВДЯКИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМИ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ.	800 000 ЄВРО НА РІК
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТ (ЗАВОД У ХОМБУРЗІ)	ТЕРМІН ОКУПНОСТІ КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ НА ВПРОВАДЖЕННЯ.	МЕНШЕ ДВОХ РОКІВ

Рисунок 2.1 - Результати оптимізації виробничих процесів Bosch, досягнуті завдяки Nexeed*

*Джерело: складено автором за [30]

Додатковий вимір конкурентних переваг Bosch пов'язаний із використанням штучного інтелекту для планування й диспетчеризації виробництва. На фабриці напівпровідників у Ройтлінгені алгоритми оптимізації маршрутизації пластин через понад тисячу технологічних операцій забезпечили близько 5 % прискорення проходження продукції по лінії за строк окупності інвестицій у кілька місяців [30]. Для такої капіталомісткої галузі, як напівпровідникове виробництво, навіть кілька відсотків приросту пропускної здатності в поєднанні зі скороченням простоїв означають суттєве зниження питомих витрат і можливість гнучкіше реагувати на коливання попиту. У поєднанні з наскрізною візуалізацією процесів, мобільними інтерфейсами для працівників і модульною організацією виробничих систем це дозволяє Bosch позиціонувати свої «розумні фабрики» як еталон ефективності, якості й сталість – і водночас використовувати напрацьовані рішення як комерційний продукт для інших виробників [30].

Компанія Siemens демонструє іншу, але близьку за логікою траєкторію – цифрова трансформація власних виробничих майданчиків поєднується з розвитком портфеля програмно-апаратних рішень для «розумних фабрик» у світі. Еталонним кейсом є завод Electronics Works Amberg у Німеччині, де виробляються програмовані логічні контролери та інша електроніка для промислової автоматизації. На цьому підприємстві значна частина виробничих і логістичних операцій автоматизована, а керування здійснюється на основі комплексної цифрової моделі – цифрового двійника підприємства, що інтегрує дані з рівнів промислового Інтернету речей, систем управління виробничими операціями, систем корпоративного планування ресурсів підприємства та систем проєктування [32; 33]. За оцінками галузевих оглядів, за кілька десятиліть модернізації й цифровізації завод досягнув зростання продуктивності у багато разів (порівняно з початковими показниками 1990-х років), при цьому кількість персоналу залишилася відносно стабільною, а частка дефектної продукції скоротилася до мінімальних значень [32; 33]. Ключові економічні переваги

впровадження концепції «Розумне виробництво», згідно з візією компанії Siemens, систематизовано на рис. 2.2.

Smart manufacturing delivers business benefits



Рисунок 2.2 - Ключові економічні переваги впровадження концепції «Розумне виробництво», Siemens*

*Джерело: складено автором за [32]

Ключовою особливістю підходу Siemens є поєднання принципів ощадливого виробництва з використанням штучного інтелекту в управлінні якістю. На практиці це означає перехід від вибіркового контролю до безперервного відстеження параметрів процесу й продукції з використанням алгоритмів машинного навчання, здатних виявляти патерни, які передують відхиленню якості [32]. Цифровий двійник заводу дає змогу моделювати вплив змін у конфігурації ліній, режимах роботи обладнання, логістиці матеріалів на завантаження потужностей і виконання замовлень. Це скорочує терміни переналагодження, зменшує запаси незавершеного виробництва, оптимізує використання площі, як наслідок, підвищує конкурентоспроможність як самого виробництва, так і ліцензійованих рішень Siemens для клієнтів. У цьому сенсі «розумні фабрики» Siemens стають демонстраційними майданчиками, де

компанія відпрацьовує архітектуру цифрового підприємства, яке потім тиражується у глобальній мережі замовників [32; 33].

Приклад Tesla показує інший тип «розумних фабрик» – орієнтованих на швидке масштабування нової технологічної платформи та високий ступінь вертикальної інтеграції. Мережа так званих “гігафабрик” Tesla у США, Мексиці, Європі й Китаї, зображена на рис. 2.3, поєднує виробництво електромобілів, акумуляторних елементів і модулів, силової електроніки й компонентів систем керування в єдині інтегровані кластери [34]. Виробничі процеси характеризуються високим рівнем роботизації, широким застосуванням комп’ютерного зору для контролю якості, а також тісною інтеграцією з інженерними та програмними підрозділами компанії. За рахунок цього Tesla вдалося досягти великих обсягів випуску (сукупна потужність перевищує мільйон автомобілів на рік) при одночасному скороченні тривалості виробничих циклів і швидкому запуску нових моделей [34; 35].

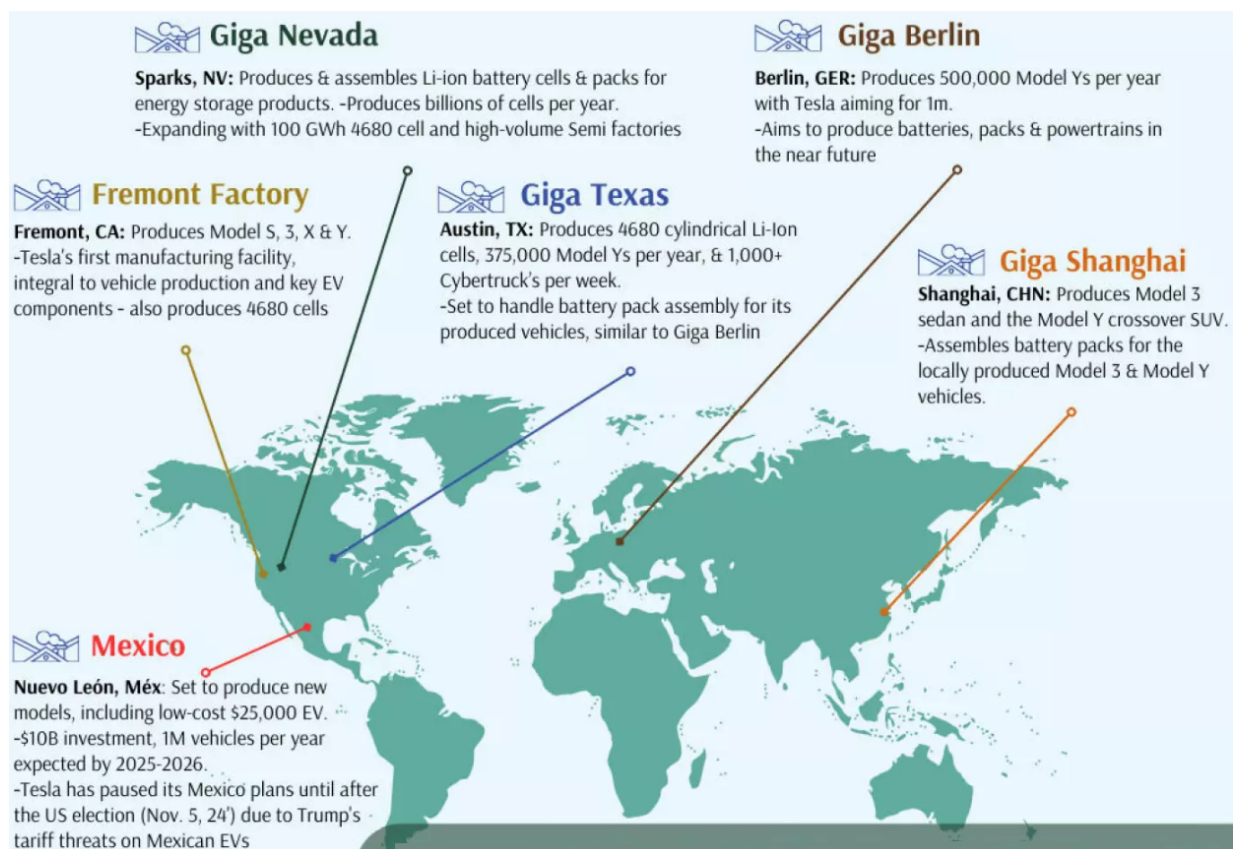


Рисунок 2.3 - Мережа “гігафабрик” Tesla з показниками продуктивності*

*Джерело: складено автором за [34]

У публікаціях, присвячених організації виробництва на “гігафабриках”, підкреслюється роль даних як ключового ресурсу: практично всі операції від постачання компонентів до тестування готових автомобілів супроводжуються збором даних у реальному часі, які надалі використовуються для оптимізації логістики, планування, технічного обслуговування й покращення конструкції виробів [34]. Концепція модульно-компонентного виробництва передбачає формування виробничих ліній з окремих модулів, у межах яких вузли автомобіля збираються автономно та подальше їх інтегрування в кінцевий виріб дозволяє скоротити переміщення, знизити складність процесів і підвищити гнучкість виробництва [34; 35]. У поєднанні з повністю цифровими каналами продажу та дистанційним оновленням програмного забезпечення без фізичного втручання (over-the-air) та власною мережею зарядної інфраструктури це формує специфічну структуру конкурентних переваг Tesla, де «розумні фабрики» є ядром програмно-орієнтованого виробничого ланцюга.

Кейс Foxconn демонструє, як логіка «розумних фабрик» реалізується у форматі контрактного виробництва для глобальних брендів. Foxconn, один з найбільших у світі виробників електроніки, розгорнув промислову інтернет-платформу BEACON, яка інтегрує дані з різноманітних виробничих ліній, обладнання й інформаційних систем у глобальній мережі підприємств компанії [36]. Платформа забезпечує збір і аналіз великомасштабних масивів даних щодо завантаження потужностей, якості, простоїв, енергоспоживання й логістичних операцій, що дозволяє виявляти «вузькі місця» та впроваджувати стандартизовані практики підвищення ефективності в різних регіонах [36]. Додатковим елементом цифрової трансформації Foxconn є впровадження віртуальної десктопної інфраструктури (VDI) на заводах, що спрощує управління робочими місцями, підвищує безпеку й гнучкість масштабування інформаційних сервісів у виробничому середовищі [37].

Розвиток Foxconn Industrial Internet супроводжується впровадженням рішень на основі стандартів часово чутливих мереж (TSN) для забезпечення надійного, детермінованого обміну даними між рівнями інформаційних і

операційних технологій, а також нарощуванням застосування штучного інтелекту й робототехніки на виробничих лініях [36]. Такі рішення спрямовані на досягнення вищої продуктивності, скорочення простоїв і кращу передбачуваність якості виробів за рахунок своєчасного виявлення аномалій. Для Foxconn «розумні фабрики» – це інструмент утримання позицій у глобальній конкуренції контрактних виробників, де вирішальне значення мають можливість масштабувати випуск, забезпечувати стабільну якість для різних брендів, гнучко переорієнтовувати потужності між замовниками та мінімізувати витрати [36; 37].

Приклад BMW ілюструє, як концепція «розумних фабрик» вбудовується в довгострокову виробничу стратегію преміального автовиробника. Концепція BMW iFACTORY позиціонується як цілісний підхід до заводу майбутнього, що поєднує три принципи – ефективність, екологічну сталість і цифровізацію – та має бути реалізований на всіх ключових виробничих майданчиках компанії [38]. На заводі в Регенсбурзі, де виготовляється близько 1 400 авто щодня, а кожен новий автомобіль сходить із лінії приблизно кожні 57 секунд, впроваджено повністю цифровізований та автоматизований процес лакофарбового покриття кузовів, який вважається одним із перших у галузі повністю інтегрованих рішень такого типу [38]. Логістика всередині підприємства керується хмарною системою управління транспортними засобами, що координує рух внутрішнього транспорту, постачання компонентів і завантаження робочих місць у режимі реального часу, зменшуючи простої й оптимізуючи використання складських площ [39].

Особливу увагу BMW приділяє використанню штучного інтелекту для контролю якості. На регенсбурзькому заводі розгорнуто системи комп'ютерного зору й, останнім часом, генеративного штучного інтелекту (проект «GenAI4Q») для автоматизації візуальних перевірок, що дозволяє прискорити процес, підвищити однорідність оцінки й знизити ймовірність пропуску дефектів [38; 39]. Завдяки цим рішенням підприємство було відзначене галузевими нагородами, зокрема як один із зразкових заводів із точки зору поєднання продуктивності, якості й цифрової зрілості [38]. У поєднанні з ініціативами щодо

зменшення вуглецевого сліду, замикання матеріальних циклів і гнучкого мульти-модельного виробництва концепція BMW iFACTORY демонструє, як «розумні фабрики» можуть стати ядром стратегії конкурентоспроможності в сегменті «преміум» [38; 39].

Узагальнення п'яти розглянутих кейсів дозволяє виокремити як спільні риси, так і відмінності підходів до побудови «розумних фабрик». Спільним є опора на інтеграцію даних з усіх рівнів виробничої системи, використання промислового Інтернету речей для безперервного моніторингу обладнання та процесів, впровадження платформ аналітики й штучного інтелекту для оптимізації виробництва, а також тісний зв'язок між цифровою архітектурою підприємства та бізнес-стратегією. Водночас Bosch і Siemens демонструють модель, де «розумні фабрики» виступають одночасно полігоном для власних технологій та вітриною для клієнтів, тоді як Tesla й Foxconn орієнтуються на досягнення масштабної ефективності й гнучкості в умовах глобальної конкуренції за замовлення, а BMW – на поєднання якості, кастомізації й сталості як складових преміальної ціннісної пропозиції. Основні параметри цих кейсів – домінуючі технології, ключові виробничі показники ефективності та конкурентні переваги узагальнено у порівняльній табл. В. 1 (див. Додаток В), що дозволить чіткіше показати, як різні конфігурації «розумних фабрик» забезпечують успіх компаній у глобальній конкуренції.

З позицій національної конкурентоспроможності розглянуті кейси важливі ще й тим, що вони слугують референтними моделями для промислової політики відповідних країн. Німецькі Bosch, Siemens і BMW демонструють, як довгострокові інвестиції в Індустрію 4.0, інженерні кадри й стандарти можуть зміцнювати позиції країни у високотехнологічних сегментах; Tesla ілюструє роль «розумних фабрик» у формуванні національного лідерства на ринку електромобілів і акумуляторних технологій; Foxconn – значення цифровізації для утримання й посилення ролі Тайваню та Китаю як глобальних виробничих хабів. Надалі ці практики можуть бути використані як орієнтири для оцінки й коригування стратегій країн, що прагнуть інтегруватися у глобальні ланцюги

створення вартості на основі розвитку власних «розумних фабрик» і пов'язаних з ними екосистем.

2.3 Порівняльний аналіз рівня цифровізації виробництва у провідних країнах світу

Порівняльний аналіз рівня цифровізації виробництва у провідних країнах доцільно будувати не лише на описі декларованих стратегій, але й на зіставленні фактичних показників: щільності використання промислових роботів, поширеності хмарних обчислень та великих даних у бізнес-секторі, розвитку промислового Інтернету речей, масштабів програм «розумних фабрик» і структури високотехнологічного експорту. Для США, Німеччини, Китаю та Південної Кореї ці індикатори вже сформували специфічні «національні моделі» цифрової трансформації промисловості, що безпосередньо впливають на глобальну конкурентоспроможність їхніх компаній.

Важливим інтегральним показником є щільність роботизації у промисловості – кількість промислових роботів на 10 тис. працівників, що наочно проілюстровано на рис. 2.4.

За даними Міжнародної федерації робототехніки, станом на 2023 р. Південна Корея є світовим лідером із показником 1012 роботів на 10 тис. зайнятих у переробній промисловості; Китай посідає третє місце у світі з близько 470 роботами; Німеччина має 429 роботів, тоді як США – близько 295 роботів на 10 тис. працівників [41; 42]. Це означає, що навіть серед групи технологічних лідерів спостерігається суттєва диференціація рівня автоматизації: Південна Корея й Китай демонструють дуже високі темпи нарощування роботизованих потужностей, тоді як США та Німеччина частково спираються на інші компоненти цифровізації (хмарні сервіси, програмні платформи, інтелектуальні системи керування).

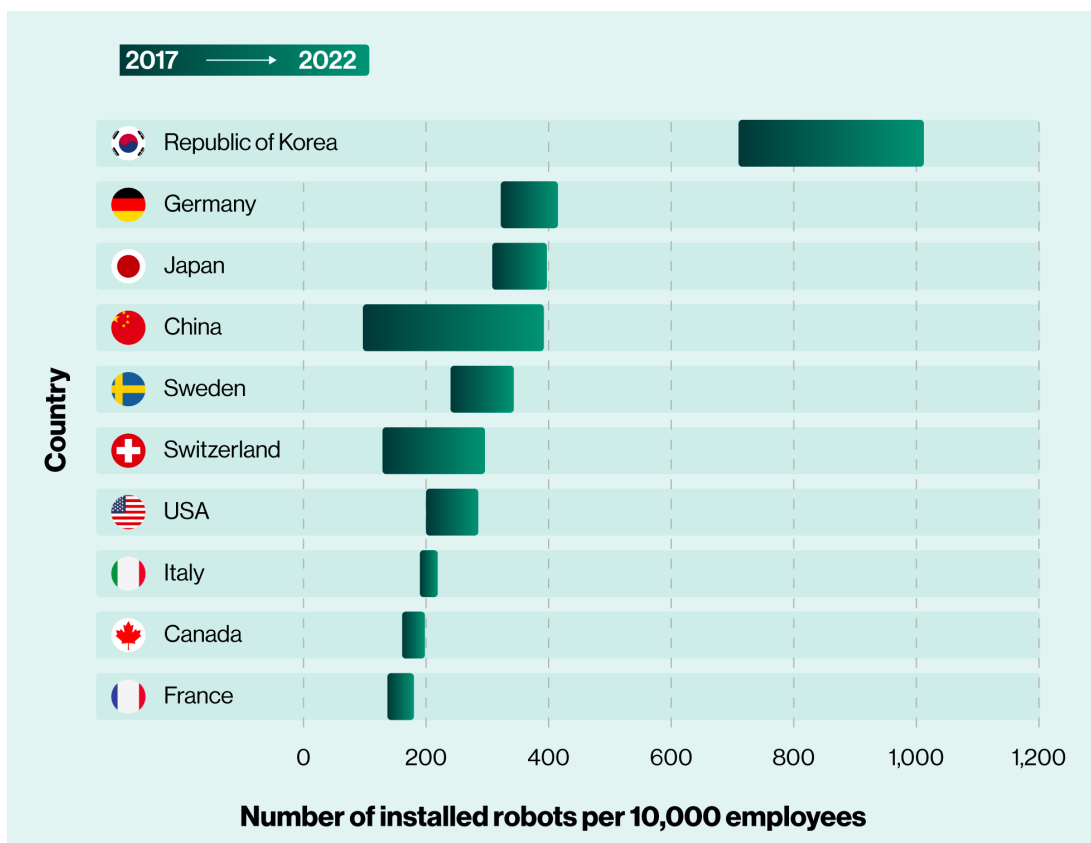


Рисунок 2.4 – Кількість промислових роботів на 10 тис. працівників у провідних країнах*

*Джерело: складено автором за [40]

Окрім відмінностей у щільності роботизації між окремими країнами, важливим є й глобальний масштаб накопиченого парку промислових роботів. За даними останнього звіту “World Robotics” Міжнародної федерації робототехніки, станом на кінець 2023 р. у світі в експлуатації перебувало 4 281 585 промислових роботів, що на 10 % більше, ніж роком раніше [43]. Якщо порівняти це значення з приблизно 1,3 млн. роботів у 2013 р., стає очевидним, що за десятиріччя глобальний парк промислових роботів більш ніж утричі зріс. Відповідну траєкторію зростання загальної кількості промислових роботів, що працюють на фабриках у світі, у 2013–2023 рр. узагальнено на рис. 2.5, який наочно демонструє перехід до якісно нового рівня автоматизації виробництва.

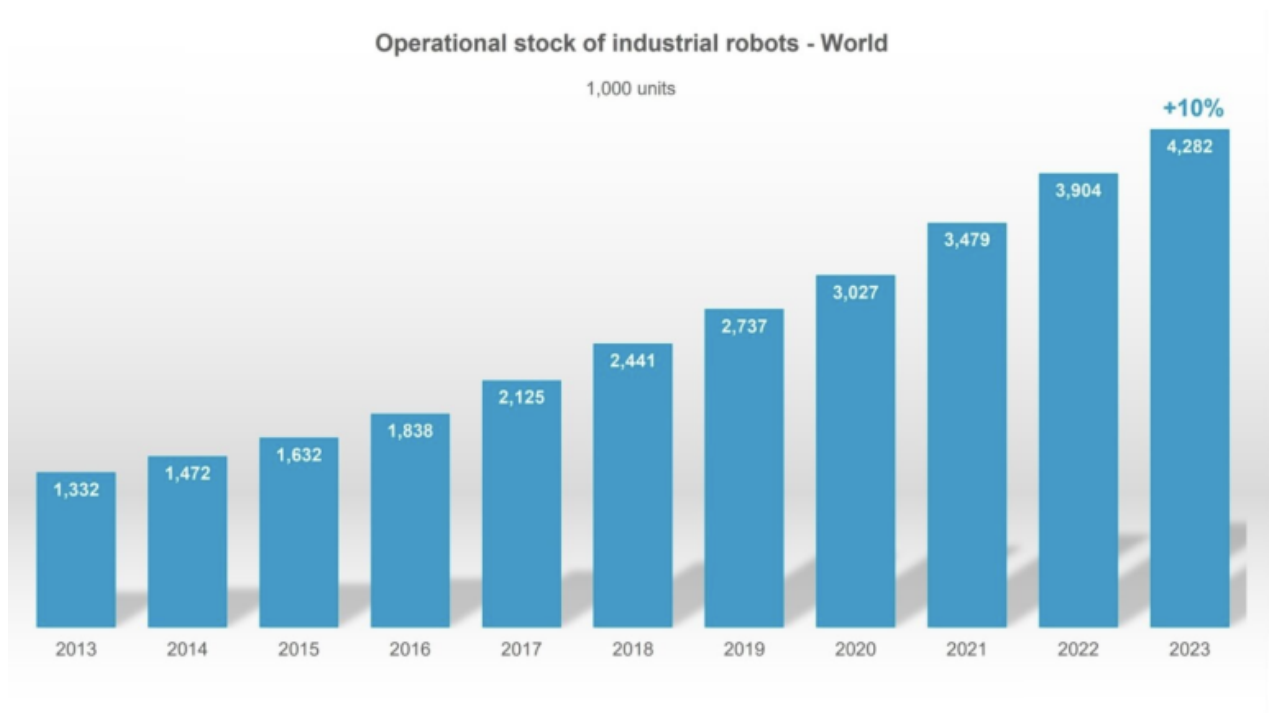


Рисунок 2.5 – Динаміка загальної кількості промислових роботів, що експлуатуються у світі, 2013–2023 рр.*

*Джерело: складено автором за [43]

У США цифровізація виробництва розвивається в контексті ширшої стратегії лідерства в передових виробничих технологіях. Оновлена Національна стратегія з передового виробництва 2022 р. визначає пріоритетами розвиток і впровадження передових виробничих технологій, зокрема «розумного виробництва», цифрових двійників, адитивних технологій, а також зміцнення виробничих ланцюгів постачання і декарбонізацію промисловості [44]. Паралельно Закон «CHIPS and Science Act 2022» передбачає понад 52,7 млрд. дол. США прямої підтримки виробництва напівпровідників і інвестицій у дослідження, а також податкові стимули для обладнання, що прямо стосується модернізації високотехнологічних виробництв і формування нових кластерів «розумних фабрик» у мікроелектроніці [45].

З боку реальної цифрової інфраструктури США мають одну з найбільш розвинених екосистем хмарних обчислень у світі. Частка американських компаній, що використовують хмарні сервіси для аналізу даних, за оцінками

Національного наукового фонду США, вже у 2020–2021 рр. досягала близько 19,5 % усіх фірм, що значно перевищує рівень впровадження більш складних цифрових технологій на кшталт штучного інтелекту чи робототехніки [46]. Ринок хмарних обчислень у США оцінюється у сотні мільярдів доларів, із прогнозом зростання до понад 500 млрд. дол. у середині поточного десятиліття, що забезпечує промисловим підприємствам доступ до масштабованих платформ для обробки великих даних, моделювання й керування ланцюгами постачання [47].

Попри це, рівень роботизації в американській промисловості нижчий, ніж у Німеччині, Китаї чи Південній Кореї, – близько 295 роботів на 10 тис. працівників, що відображає структурні особливості промислової бази (більша роль послуг, менш трудомісткі сегменти обробної промисловості, відносно повільніша модернізація частини традиційних виробництв) [42]. Водночас США мають перевагу в цифрово-інтенсивних сервісах, які «вбудовуються» в промисловий експорт у вигляді програмного забезпечення, інжинірингових послуг, хмарних платформ тощо: за даними ОЕСР, частка цифрово-інтенсивних послуг, втілених у промисловому експорті, є однією з найвищих у світі, що свідчить про сильну «сервісну надбудову» над виробничим сектором [48]. Таким чином, модель цифровізації США базується не стільки на максимальній фізичній автоматизації кожного цеху, скільки на поєднанні високотехнологічних промислових кластерів із глобальним домінуванням в ІКТ-секторах (інформаційно-комунікаційні технології) та хмарних платформах.

У Німеччині цифровізація виробництва формувалася навколо державноприватної ініціативи «Industrie 4.0», що була започаткована на початку 2010-х років у рамках стратегії «High-Tech 2020» і згодом інституціоналізована через платформу «Industrie 4.0» [49; 50]. Ця платформа об'єднує уряд, бізнес, наукові установи та галузеві асоціації, фокусуючись на стандартизації, інтероперабельності промислових систем, безпеці даних і підтримці малих та середніх підприємств у впровадженні рішень Індустрії 4.0. Підхід Німеччини робить акцент на модернізації високотехнологічного машинобудування,

автомобілебудування та електротехнічної промисловості через широке впровадження кібервиробничих систем, цифрових двійників, інтегрованих систем керування виробництвом.

За даними Міжнародної федерації робототехніки, Німеччина входить до топ-5 країн світу за щільністю промислових роботів: у 2023 р. вона становила приблизно 429 роботів на 10 тис. працівників, що удвічі перевищує середньоєвропейський рівень [42]. Це підтверджує високий ступінь автоматизації в ключових експортноорієнтованих секторах. З іншого боку, рівень використання хмарних обчислень німецьким бізнесом, хоча й зростає, все ще дещо нижчий, ніж у цифрових лідерів Північної Європи: частка підприємств, які купували хмарні послуги у 2023 р., оцінюється близько 47 %, тоді як середній показник по ЄС – близько 45,2 % [51]. Це свідчить про поступову, але не надто швидко інтеграцію хмарної інфраструктури в діяльність виробничих компаній, які традиційно характеризуються консервативними підходами до управління даними та кібербезпеки.

З погляду структури експорту Німеччина є одним із найбільших у світі постачальників високотехнологічної продукції – машин, обладнання, автомобілів, електронних компонентів. Саме ці галузі, згідно з аналітикою ОЕСР, належать до групи найбільш цифрово-інтенсивних: вони активно використовують автоматизацію, робототехніку, програмовані логічні контролери та спеціалізоване програмне забезпечення [48]. Висока щільність роботизації в поєднанні з відносно помірною, але зростаючою хмарною інтеграцією формує модель, де конкурентоспроможність базується на високій точності, якості й енергоефективності «розумних фабрик», але з певними викликами щодо швидкості масштабування цифрових платформ та сервісних бізнес-моделей.

Цифровізація промисловості Китаю розгортається у межах комплексних стратегій, таких як «Made in China 2025» та політика розвитку промислового Інтернету. Ключовим елементом є формування національної екосистеми промислових інтернет-платформ, які з'єднують обладнання, підприємства й

галузі в єдиний цифровий простір. За даними Міністерства промисловості й інформатизації КНР, станом на кінець 2023 р. у країні функціонує понад 340 промислових інтернет-платформ із суттєвим ринковим впливом, до яких підключено понад 96 млн. одиниць промислового обладнання [52; 53]. Раніше повідомлялося про понад 240 «впливових» платформ і більш ніж 1 500 проєктів «5G + промисловий Інтернет», що демонструє надзвичайно високий масштаб цифрової інтеграції у виробничому секторі [54].

Китайські підприємства інтенсивно впроваджують промислових роботів: за даними IFR, країна не лише забезпечує понад половину світових установок роботів щорічно, але й досягла щільності приблизно 470 роботів на 10 тис. працівників у 2023 р., випередивши за цим показником Німеччину й наблизившись до рівня Японії [41; 42]. Це поєднується зі швидким розвитком ринку промислового Інтернету, обсяг якого лише у 2022 р. оцінювався в сотні мільярдів юанів із двозначними темпами зростання [53]. Масштабні інвестиції в 5G-мережі (понад 3,3 млн базових станцій станом на кінець 2023 р.) створюють інфраструктурні умови для масового розгортання «розумних фабрик» у різних галузях – від електроніки й автомобілебудування до металургії й хімічної промисловості [54]. Порівняльні масштаби роботизації промисловості Китаю відносно інших провідних країн світу проілюстровано на рис. 2.6.

Разом із тим китайська модель цифровізації має специфічні риси. По-перше, значна частина проєктів орієнтована на внутрішній ринок, що дозволяє швидко масштабувати техніко-технологічні рішення, але створює певні бар'єри для повної інтероперабельності з глобальними стандартами. По-друге, високий рівень автоматизації й поширення так званих «темних фабрик» – повністю автоматизованих виробництв із мінімальною участю людини – підсилює напруження на ринку праці та викликає дискусії щодо соціальних наслідків цифрової трансформації [41]. По-третє, державна підтримка цифровізації обробної промисловості прямо інтегрована в експортну стратегію: зростання автоматизації сприяє здешевленню високотехнологічної продукції й посиленню цінової конкуренції на світових ринках.

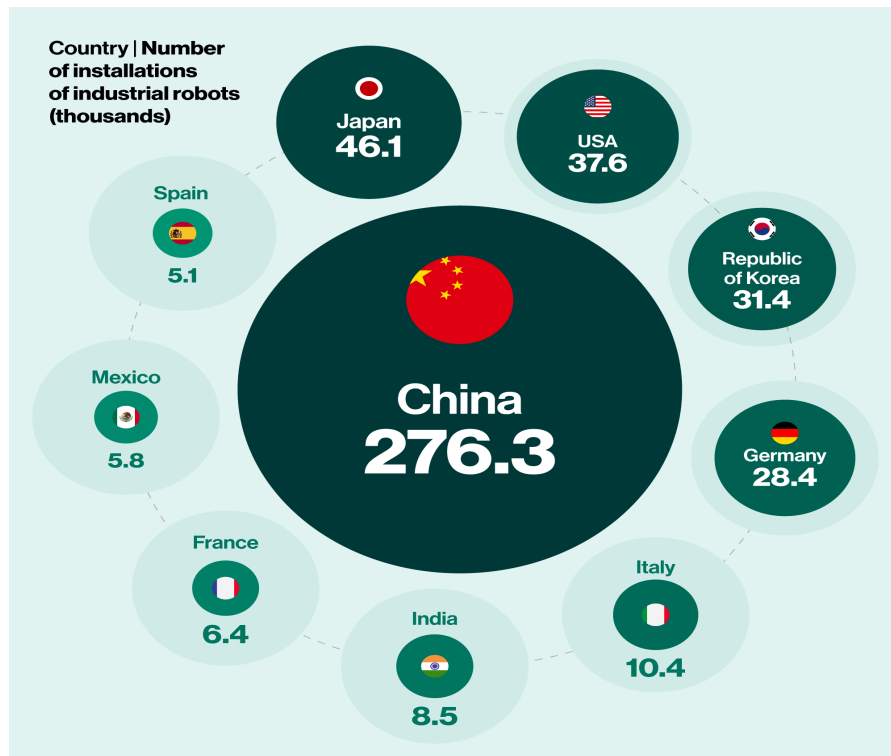


Рисунок 2.6 – Порівняльні масштаби роботизації промисловості в окремих провідних країнах світу, 2023 р.*

*Джерело: складено автором за [40]

Південна Корея демонструє одну з найпослідовніших і найагресивніших стратегій цифровізації виробництва серед розвинених економік. У межах урядової стратегії «Smart Manufacturing Innovation» та ширших програм розвитку Індустрії 4.0 Корея системно розбудовує мережу «розумних фабрик» і цифрової інфраструктури. За оцінками, до 2023 р. в країні було створено близько 30 тис. «розумних фабрик», причому значна частина з них — на базі малих і середніх підприємств, які отримували державну підтримку у вигляді грантів, податкових пільг та консультацій [55; 56]. Водночас уряд ставить нові цілі – розширення мережі та підвищення «рівня зрілості» цих фабрик, переходу від базової автоматизації до інтегрованих цифрових платформ, використання штучного інтелекту й цифрових двійників [57].

Південна Корея є беззаперечним лідером за щільністю роботизації: понад 1 000 роботів на 10 тис. працівників у промисловості, що більш ніж у три рази

перевищує середньосвітовий рівень і суттєво випереджає показники Німеччини, Китаю та США [42]. Це відображає стратегічну орієнтацію країни на інтенсивну автоматизацію в автомобілебудуванні, електроніці, виробництві акумуляторів і компонентів для відновлюваної енергетики. Паралельно формується ринок рішень для цифрових двійників і «розумного виробництва», обсяг якого оцінюється в сотні мільйонів доларів і зростає завдяки інтеграції Інтернету речей, аналітики в реальному часі та цифрових платформ у ключових галузях [58].

Порівняння наведених країн за двома базовими кількісними показниками цифровізації промисловості – щільністю використання промислових роботів та поширеністю хмарних обчислень і аналітики даних у бізнес-секторі – узагальнено в табл. 2.3. Таблиця наочно демонструє суттєвий розрив між Південною Кореєю та іншими країнами за рівнем роботизації, поєднання в Китаї високої щільності промислових роботів з активним впровадженням хмарних рішень у великих компаніях, відносну перевагу Німеччини за охопленням хмарними послугами серед підприємств ЄС, а також сильні позиції США в сегменті хмарних сервісів і аналітики даних, що підтримують глобальні ланцюги створення вартості.

Таблиця 2.3 – Ключові кількісні показники цифровізації промисловості (роботизація та хмарні технології)*

Країна	Щільність промислових роботів, од. на 10 тис. працівників (2023 р.)	Охоплення хмарними обчисленнями / аналітикою даних у бізнес-секторі
США	≈295	Близько 19,5 % підприємств використовують хмарні сервіси для аналізу даних (оцінка Національного наукового фонду США для 2020–2021 рр.).
Німеччина	≈429	Приблизно 47 % підприємств купували хмарні послуги у 2023 р. (вище середнього рівня по ЄС).
Китай	≈470	Великі промислові компанії активно використовують хмарні обчислення та

		аналітику великих даних; системні статистичні дані щодо частки підприємств є фрагментарними.
Південна Корея	≈1 012	Широке поширення хмарних і аналітичних рішень у великих корпораціях; для малих і середніх підприємств цифровізація стимулюється державними програмами.

*Джерело: складено автором за [41; 42; 46; 51]

Однак простих кількісних індикаторів недостатньо для пояснення конкурентних позицій. Не менш важливими є характеристики національних стратегій цифровізації виробництва – їх фокус, доступні інструменти політики, інституційні обмеження та «вузькі місця». У США основний наголос зроблено на підтримці передових технологій (штучний інтелект, напівпровідники, квантові технології) і зміцненні інноваційної та дослідницької бази через програми на кшталт «Manufacturing USA», «CHIPS and Science Act» і «Національної стратегії з передового виробництва» [44; 45]. Слабким місцем залишається нерівномірність проникнення цифрових технологій серед малих та середніх виробників, а також регіональна концентрація нових виробничих інвестицій.

Німеччина вибудувала більш «інституціоналізовану» модель, де платформа «Industrie 4.0» відіграє роль координаційного центру, а ключова увага приділяється стандартизації, безпеці, підтримці «Mittelstand» і розробці спільних дорожніх карт для галузей [49; 50]. Перевагою є глибока координація між державою, бізнесом і наукою, однак викликами залишаються дефіцит цифрових компетенцій, обмежена швидкість модернізації інфраструктури й відносно повільне розгортання хмарних рішень порівняно з лідерами Півночі Європи.

Китайська стратегія, навпаки, вирізняється масштабністю державних програм і швидкістю розгортання промислового Інтернету. Завдяки великому внутрішньому ринку й спрямованим інвестиціям країна змогла за кілька років перейти від позиції наздоганяючого до глобального лідера за обсягами встановлення промислових роботів та кількістю промислових інтернет-

платформ. Водночас така модель пов'язана з ризиками надлишкових інвестицій, нерівномірної якості впроваджень і потенційної технологічної «замкненості» у власних стандартах.

Південна Корея демонструє «цільову» модель цифровізації, що поєднує дуже високий рівень роботизації з масовою програмою підтримки «розумних фабрик» для МСП, активним розвитком цифрових двійників і тісною інтеграцією промислових політик із стратегіями в енергетиці, транспорті й «зеленому зростанні». Серед слабких місць відзначаються висока залежність від глобальних ланцюгів постачання в окремих технологічних сегментах і ризики «перегріву» ринку праці в умовах швидкого зростання попиту на висококваліфіковані цифрові кадри.

Якісний порівняльний аналіз масштабів розвитку промислового Інтернету та програм підтримки «розумних фабрик» у США, Німеччині, Китаї та Південній Кореї узагальнено в табл. 2.4. У ній, зокрема, показано, що:

- США роблять ставку на розвинену екосистему цифрових платформ і сервісів для промисловості (хмарні рішення, аналітика великих даних, платформи промислового Інтернету речей, цифрові двійники) у поєднанні з програмами державної підтримки передового виробництва та модернізації критичних ланцюгів постачання;

- Німеччина комбінує високу концентрацію роботизованих і цифровізованих виробництв у машинобудуванні, автомобілебудуванні та електротехніці з інституційно оформленою ініціативою «Industrie 4.0» і галузевими дорожніми картами цифрової трансформації;

- Китай поєднує масштабний розвиток промислових інтернет-платформ (сотні промислових платформ, десятки мільйонів підключених одиниць обладнання) з активними державними програмами підтримки «5G + промисловий Інтернет» та модернізації експортно орієнтованих галузей;

- Південна Корея виступає еталонним прикладом масового розгортання програм «розумних фабрик» для малих і середніх підприємств, реалізуючи

державні програми, спрямовані на створення десятків тисяч «розумних фабрик» і підвищення рівня їх цифрової зрілості.

Таблиця 2.4 – Масштаби промислового Інтернету та програм “розумних фабрик” у провідних країнах*

Країна	Масштаби промислового Інтернету та «розумних фабрик»	Ключові програми та політики
США	Розвинена екосистема цифрових платформ і сервісів для промисловості (хмарні рішення, аналітика великих даних, платформи ІоТ, цифрові двійники), активне використання цифрових рішень у високотехнологічних виробничих кластерах.	Ініціативи Manufacturing USA та National Strategy for Advanced Manufacturing, програми CHIPS and Science Act та інші інструменти підтримки передового виробництва й модернізації критичних ланцюгів постачання.
Німеччина	Висока концентрація цифровізованих і роботизованих виробництв у машинобудуванні, автомобілебудуванні та електротехніці; широке застосування кібервиробничих систем, цифрових двійників та інтегрованих систем керування виробництвом.	Ініціатива «Industrie 4.0» та платформа Plattform Industrie 4.0, галузеві дорожні карти цифрової трансформації, спеціальні програми підтримки Mittelstand для впровадження рішень Індустрії 4.0.
Китай	Понад 340 промислових інтернет-платформ із суттєвим ринковим впливом, понад 96 млн підключених одиниць промислового обладнання, сотні (понад 1 500) пілотних і демонстраційних проєктів «5G + промисловий Інтернет» станом на 2023 р.	Стратегія «Made in China 2025» та державні програми розвитку промислового Інтернету; цільові субсидії та стимули для розгортання ІоТ і 5G у промисловості; фокус на модернізації експортноорієнтованих галузей.
Південна Корея	Понад 19,8 тис. «розумних фабрик», створених у рамках національної програми на початок 2020-х років; урядовий орієнтир – досягнення близько 30 тис. smart-фабрик, значна частка яких припадає на малі та середні підприємства.	Державні програми «Smart Factory» та «Smart Manufacturing Innovation», широкомасштабна підтримка МСП (гранти, податкові пільги, консалтинг); нові етапи програм спрямовані на підвищення рівня цифрової зрілості, інтеграцію ІІІ, цифрових двійників та «зелених» рішень у виробництві.

*Джерело: складено автором за [52; 53; 44–50; 55–58]

Узагальнюючи, можна зазначити, що всі чотири країни демонструють високий рівень цифровізації промисловості, але структури їхніх моделей суттєво різняться. Для подальшого аналізу конкурентоспроможності «розумних фабрик»

важливо враховувати не лише абсолютні значення окремих індикаторів (робіт на 10 тис. працівників, частку підприємств, що використовують хмарні сервіси чи аналітику даних), а й те, як ці елементи поєднуються в цілісні національні екосистеми – від державних стратегій і регуляторної бази до інноваційної інфраструктури, підготовки кадрів і здатності бізнесу інтегруватися в глобальні ланцюги створення вартості з високою доданою вартістю. Саме в такому контексті «розумні фабрики» стають не просто сукупністю технологій, а системним чинником глобальної конкурентоспроможності країн і компаній.

3 ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ «РОЗУМНИХ ФАБРИК» ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНОСТІ МІЖНАРОДНОГО БІЗНЕСУ

3.1 Вплив «розумних фабрик» на ефективність, інноваційність та сталий розвиток

Розвиток «розумних фабрик» означає перехід від фрагментарної цифровізації окремих операцій до якісно нової логіки організації виробництва, де дані в режимі реального часу, кіберфізичні системи та мережеві платформи стають базою створення вартості. У такій логіці традиційні показники результативності – продуктивність праці, собівартість, якість продукції – тісно переплітаються з інноваційною спроможністю підприємств та орієнтацією на цілі сталого розвитку. Тому для оцінювання впливу «розумних фабрик» на конкурентоспроможність доцільно застосовувати інтегрований підхід, що виділяє три взаємопов'язані виміри: ефективність виробництва, інноваційність та сталий розвиток.

У попередніх розділах було показано, що впровадження рішень «розумних фабрик» у провідних компаніях (Bosch, Siemens, Tesla, BMW, Foxconn тощо) супроводжується суттєвим покращенням операційних показників, прискоренням інноваційних циклів та зменшенням негативного впливу виробництва на довкілля. На цій основі в даному підрозділі формалізується рамка оцінювання у вигляді табл. 3.1, яка дозволяє структуровано аналізувати вплив «розумних фабрик» через три зазначені виміри, узгоджуючи мікрорівневі показники підприємств із макрорівневими цілями конкурентоспроможності та сталого розвитку.

Таблиця 3.1 – Інтегрована рамка оцінювання впливу «розумних фабрик» на ефективність, інноваційність та сталий розвиток*

Вимір	Ключові показники	Основні механізми впливу «розумних фабрик»	Типові результати
Ефективність виробництва	Продуктивність праці та обладнання (ОЕЕ); собівартість одиниці продукції; рівень браку та рекламаций.	Промисловий Інтернет речей та сенсорики; моніторинг у реальному часі й передиктивне обслуговування; інтеграція ERP–MES–SCM для оптимізації витрат.	Зростання продуктивності на десятки відсотків; зниження операційних витрат і браку; стабільна якість продукції на рівні провідних світових виробників.
Інноваційність	Скорочення time-to-market; частка нових продуктів у продажу; гнучкість виробничих ліній.	Цифрові двійники та віртуальне моделювання; модульне обладнання й робототехніка з швидким переналаштуванням; цифрові платформи для управління портфелем продуктів.	Прискорений запуск нових продуктів; масове кастомізоване виробництво; формування нових сервісних і платформених бізнес-моделей.
Сталий розвиток	Енергоємність продукції; рівень викидів парникових газів; обсяг виробничих відходів.	Детальний моніторинг споживання енергії; цифровий облік викидів і ресурсів на всіх стадіях циклу; технології повторного використання та переробки матеріалів.	Зниження енергоємності та вуглецевого сліду; скорочення відходів і перехід до циркулярних моделей; покращення ESG-профілю компанії на глобальних ринках.

*Джерело: складено автором за [7; 11]

Перший вимір рамки – ефективність виробництва – відображає, наскільки глибоко «розумні фабрики» змінюють показники продуктивності, структури витрат та якості продукції. Одним із базових індикаторів є продуктивність праці та обладнання. Завдяки використанню промислового Інтернету речей, сенсорики

й систем моніторингу у реальному часі підприємства отримують змогу фіксувати відхилення параметрів роботи устаткування ще до виникнення критичних відмов. Це формує основу для впровадження передиктивного технічного обслуговування, скорочення незапланованих простоїв та підвищення загального коефіцієнта ефективності обладнання.

Другий блок показників ефективності пов'язаний із собівартістю одиниці продукції. «Розумні фабрики» дають змогу знижувати витрати завдяки поєднанню кількох механізмів: оптимізації використання матеріалів (через точне дозування та зменшення браку), підвищення енергоефективності, скорочення надлишкових запасів, а також зменшення витрат на переробку дефектної продукції. Інтеграція систем планування ресурсів підприємства, управління виробничими процесами та ланцюгами постачання у єдиний цифровий контур робить процеси прозорими та керованими: виробничі плани краще узгоджуються з реальним попитом, знижуються втрати від надвиробництва та простоїв через відсутність комплектуючих.

Третій важливий аспект – якість продукції та стабільність процесів. На традиційних виробництвах контроль якості часто здійснюється на фінальній стадії, що обмежує можливості реагування. На «розумних фабриках» контроль дедалі частіше вбудовується безпосередньо у виробничі операції. Системи комп'ютерного зору, машинного навчання та статистичного контролю процесів дають змогу виявляти аномалії в параметрах продукції або обладнання у реальному часі й автоматично коригувати режими роботи. У результаті зменшується частка браку, скорочуються витрати на переробку, підвищується довіра споживачів до бренда та знижується ризик рекламацій на міжнародних ринках.

Таким чином, у вимірі ефективності виробництва «розумні фабрики» забезпечують не одноразове підвищення результативності, а формують динамічну здатність до постійної оптимізації. Компанії, які успішно інтегрують цифрові технології на рівні всього виробничого контуру, отримують змогу швидко адаптувати структуру витрат і продуктивність до змін зовнішнього

середовища, що є критичним чинником конкурентоспроможності на глобальних ринках.

Другий вимір – інноваційність – характеризує здатність підприємства генерувати, тестувати й виводити на ринок нові продукти, послуги й бізнес-моделі. Одним із ключових індикаторів тут є швидкість виведення продукту на ринок. «Розумні фабрики» істотно скорочують цей показник завдяки використанню цифрових двійників виробів і виробничих ліній, віртуального моделювання та адитивних технологій. Процеси конструювання, прототипування та валідації переносяться у цифрове середовище, що знижує потребу у великій кількості фізичних прототипів та скорочує час і витрати на їх створення.

Другий важливий показник – частка нових продуктів у загальному обсязі продажу. «Розумні фабрики» полегшують включення нових модифікацій продукції у виробничий портфель через модульність обладнання, використання робототехніки з можливістю швидкого переналаштування та тісну інтеграцію даних про замовлення із системами управління виробництвом. Це дає змогу пропонувати клієнтам ширший асортимент продуктів з різними конфігураціями без істотного зростання витрат.

Третій індикатор інноваційності – гнучкість виробничих ліній. У концепції «розумних фабрик» гнучкість досягається завдяки поєднанню модульних виробничих осередків, автономних мобільних роботів, гнучких систем транспортування та розподіленого управління. Це дозволяє оперативно змінювати послідовність операцій, переналаштовувати лінії під короткі серії продукції, поєднувати масовість і високий ступінь кастомізації. У підсумку підприємство переходить від моделі масового стандартизованого виробництва до моделі масового кастомізованого виробництва, де індивідуальні потреби клієнта враховуються без критичного збільшення собівартості.

Важливо, що цифрові платформи, які лежать в основі «розумних фабрик», створюють умови для появи нових сервісних і платформених моделей бізнесу. Завдяки збору та аналізу даних про роботу устаткування виробники можуть

пропонувати клієнтам не тільки фізичний продукт, а й сервіси з віддаленого моніторингу, оптимізації процесів, прогнозування відмов тощо. У перспективі це відкриває шлях до моделей типу «виробництво як послуга», коли клієнт платить не за придбання обладнання, а за гарантований результат (обсяг виробленої продукції, доступність потужностей тощо). Таким чином, «розумні фабрики» виступають каталізатором не лише технологічних, а й бізнес-інновацій.

Третій вимір – сталий розвиток – фокусується на впливі «розумних фабрик» на енергоємність виробництва, рівень викидів і обсяг відходів, а також на можливості переходу до циркулярних моделей. По-перше, завдяки детальному моніторингу споживання енергії на рівні окремих агрегатів і технологічних операцій, «розумні фабрики» дають змогу виявляти енергетично неефективні ділянки та оптимізувати режими роботи обладнання. Це призводить до зниження енергоємності продукції, що важливо як з позицій витрат, так і з огляду на виконання міжнародних кліматичних зобов'язань.

По-друге, цифрові системи вимірювання й аналізу даних дозволяють точніше оцінювати викиди парникових газів та інших забруднювачів на різних стадіях виробничого циклу. Завдяки цьому підприємства можуть не лише звітувати за стандартами екологічної, соціальної та управлінської відповідальності (ESG), а й активно керувати своїм вуглецевим слідом, обираючи більш екологічні технології, сировину й енергетичні джерела.

По-третє, «розумні фабрики» сприяють зменшенню обсягів відходів та розвитку циркулярних моделей завдяки точнішому дозуванню матеріалів, цифровому відстеженню життєвого циклу продукції та можливості організувати повернення й повторну переробку компонентів. Це особливо актуально для галузей з високим ресурсним навантаженням (металургія, хімічна промисловість, автомобілебудування), де поєднання економічних і екологічних ефектів від впровадження «розумних фабрик» може бути найбільш відчутним.

Систематизація трьох зазначених вимірів – ефективності виробництва, інноваційності та сталого розвитку – дозволяє сформувати інтегровану рамку оцінювання впливу «розумних фабрик» на конкурентоспроможність

підприємств і країн. На відміну від підходів, які фокусуються переважно на технологічних аспектах цифровізації або окремих фінансово-економічних показниках, запропонована рамка поєднує операційну результативність, інноваційну спроможність та екологічну складову в єдину систему аналізу.

У межах цієї роботи інтегрована рамка виконує подвійну функцію. По-перше, вона слугує концептуальною основою для інтерпретації світових кейсів «розумних фабрик», розглянутих у розділі 2, дозволяючи чітко пов'язати зафіксовані зміни в продуктивності, структурі витрат, швидкості виведення нових продуктів і показниках сталого розвитку з відповідними механізмами цифрової трансформації. По-друге, вона використовується як методологічний інструмент у подальших підрозділах розділу 3 – при формуванні практичних рекомендацій для транснаціональних корпорацій та при оцінці можливостей інтеграції технологій «розумних фабрик» у країнах, що розвиваються, зокрема в Україні.

Отже, у межах дослідження удосконалено підхід до оцінювання впливу «розумних фабрик» на конкурентоспроможність шляхом виділення трьох взаємопов'язаних вимірів – ефективності виробництва, інноваційності та сталого розвитку – та їх інтеграції в єдину аналітичну рамку. Це дозволяє не лише краще інтерпретувати емпіричні результати впровадження «розумних фабрик» у провідних компаніях і країнах, а й створює основу для розроблення практичних рекомендацій і сценаріїв політики, що буде розкрито в наступних підрозділах.

3.2 Практичні рекомендації для транснаціональних корпорацій щодо впровадження «розумних фабрик»

У контексті глобальних ланцюгів створення вартості транснаціональні корпорації є тими акторами, які визначають темпи та глибину поширення моделей «розумних фабрик» у світовій економіці. Саме вони координують мережі постачальників, розміщують виробництво в різних юрисдикціях, ухвалюють рішення щодо інвестицій у цифрову інфраструктуру й

стандартизацію технологій на десятках і сотнях майданчиків. Аналітичні звіти Всесвітнього економічного форуму та консалтингових компаній фіксують, що лідерські компанії, які системно впроваджують «розумні фабрики», досягають одночасного посилення ефективності, інноваційності та сталого розвитку [7; 21]. Водночас для більшості ТНК ключовим викликом залишається не вибір окремих рішень, а побудова цілісної траєкторії трансформації – від первинної діагностики до формування глобальної мережі «розумних фабрик» у ланцюгах створення вартості. Узагальнена послідовність переходу від локальних рішень до глобальної мережі «розумних фабрик» у ланцюгах створення вартості концептуально показана на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Дорожня карта впровадження мережі «розумних фабрик» у транснаціональних корпораціях*

*Джерело: складено автором за [59; 8]

На першому етапі стратегічної діагностики та підготовки ТНК має оцінити вихідну позицію своїх виробничих підрозділів щодо цифрової зрілості. Йдеться не лише про наявність окремих технологій, а про рівень інтегрованості даних, автоматизації процесів, цифрових компетентностей персоналу та зрілість

управлінських практик. Практично це означає проведення стандартизованого аудиту Індустрії 4.0 для ключових заводів, під час якого визначаються сильні та слабкі сторони за такими блоками, як вертикальна й горизонтальна інтеграція, використання промислового Інтернету речей, аналітика даних, кібербезпека. Паралельно формується перелік потенційних пілотних майданчиків – заводів чи виробничих ділянок, де поєднання технічних можливостей, управлінської підтримки та ринкової важливості створює найкращі умови для запуску проєктів «розумних фабрик». На цьому ж етапі вкрай важливо сформулювати узгоджене бачення й цілі трансформації: які показники ефективності, інноваційності та сталого розвитку мають бути досягнуті в середньо- та довгостроковій перспективі, які обмеження (фінансові, регуляторні, кадрові) необхідно врахувати. Ключові елементи етапу стратегічної діагностики та підготовки впровадження «розумних фабрик» у транснаціональній корпорації узагальнено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Ключові елементи етапу стратегічної діагностики та підготовки впровадження «розумних фабрик» у ТНК*

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
Цифрова зрілість виробничих підрозділів	Оцінка рівня автоматизації, наявності систем збору й обробки даних, інтеграції IT та операційних технологій	Чи є цифровий облік основних операцій? Чи використовуються MES/SCADA?	Карта поточного рівня цифрової зрілості заводів/ділянок
Інфраструктура даних та промисловий Інтернет речей	Аналіз підключення обладнання, збору даних у реальному часі, сумісності платформ і протоколів	Яке обладнання підключене до мережі? Чи є «острови» даних?	Виявлення прогалин в інфраструктурі даних і пріоритетів модернізації
Людський капітал і організаційна готовність	Оцінка цифрових компетентностей персоналу та підтримки змін з боку керівництва	Чи є відповідальні за цифрову трансформацію? Чи готові працівники до роботи з новими системами?	Розуміння потреб у навчанні та рівня готовності менеджменту
Відбір пілотних майданчиків	Ідентифікація заводів/ділянок з найкращим поєднанням	Де очікується найбільший ефект від цифровізації? Які	Сформований перелік пріоритетних

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
	технічної бази, управлінської підтримки та ринкової значущості	майданчики мають мінімальні бар'єри старту?	пілотних майданчиків
Формування цілей і обмежень трансформації	Узгодження цілей за ефективністю, інноваційністю та сталістю з урахуванням фінансових, регуляторних і кадрових обмежень	Яких показників планується досягти за 3–5 років? Які існують ключові обмеження?	Чітко сформульоване бачення та цілі етапу впровадження «розумних фабрик»

*Джерело: складено автором за [59; 12]

Другий етап передбачає розгортання пілотних проєктів «розумних фабрик» на обраних виробничих майданчиках. Логіка цього етапу полягає в тому, щоб у контрольованому середовищі протестувати поєднання технологій, організаційних змін і нових підходів до управління, не наражаючи всю мережу підприємств на надмірні ризики. Для кожного пілотного майданчика визначається обмежена, але чітко сформульована комбінація цілей: підвищення продуктивності обладнання, скорочення простоїв, зниження собівартості, зменшення браку, скорочення споживання енергії або часу виведення нових продуктів на ринок. На цій основі встановлюється система ключових показників ефективності (KPI), прив'язаних до трьох вимірів, окреслених у підрозділі 3.1: ефективності виробництва, інноваційності та сталого розвитку.

Успіх пілотних проєктів залежить не лише від технічних рішень, а й від якості управління ризиками та роботи з персоналом. Практика «маякових» фабрик показує, що подолання так званої «пастки пілотів» потребує спеціальної уваги до організації трансформаційного офісу, механізмів міжфункціональної взаємодії й розвитку компетентностей працівників. З одного боку, необхідно завчасно ідентифікувати технічні ризики (несумісність обладнання, проблеми з інтеграцією ІТ та операційних технологій, вразливості кібербезпеки) та операційні ризики (перебої у виробництві під час впровадження, логістичні обмеження, залежність від окремих постачальників). З іншого боку, критичною є комунікація зі співробітниками: цифрова трансформація неминує змінює

зміст праці, вимоги до навичок і структуру зайнятості. Тому пілотні проєкти мають супроводжуватися програмами навчання, перепідготовки та залучення персоналу до спільного опрацювання нових процесів. Зміст основних завдань і результатів етапу пілотних проєктів «розумних фабрик» у ТНК представлено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Ключові елементи етапу пілотних проєктів «розумних фабрик» у ТНК*

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
Визначення фокусу пілотного проєкту	Вибір конкретних процесів/ділянок для впровадження рішень «розумних фабрик» з урахуванням результатів діагностики	Які процеси дають найбільший потенціал підвищення ефективності / якості / сталості?	Чітко окреслений обсяг пілоту та обрані цільові процеси
Постановка цілей і КРІ пілоту	Формулювання вимірюваних цілей щодо продуктивності, якості, витрат, енергоємності, часу циклу тощо	Які цільові значення ОЕЕ, рівня браку, тривалості циклу, споживання енергії?	Набір погоджених КРІ, пов'язаних із трьома вимірами рамки (ефективність, інноваційність, сталість)
Вибір та інтеграція технологій	Впровадження комплексу технічних рішень (IoT, аналітика даних, робототехніка, цифрові платформи) на пілотному майданчику	Які технології забезпечують максимальний ефект за обраними КРІ? Чи сумісні вони з наявною інфраструктурою?	Протестована конфігурація технологій та інтегрована пілотна архітектура
Управління змінами та розвиток компетентностей	Залучення персоналу до проєкту, навчання роботі з новими системами, адаптація процедур та ролей	Чи пройшли ключові працівники навчання? Чи зрозумілі їм зміни в процесах і відповідальності?	Підготовлена команда, здатна підтримувати новий спосіб роботи на пілотному майданчику
Оцінка результатів та уроків пілоту	Порівняння до- та післяпілотних показників, відбір вдалих рішень і виявлення обмежень для масштабування	Наскільки досягнуті цільові КРІ? Які технічні та організаційні бар'єри виявлено?	Узагальнений набір практик, придатних до тиражування, та перелік ризиків/обмежень для наступних етапів

*Джерело: складено автором за [28; 8]

Подальший розвиток дорожньої карти передбачає перехід від локальних пілотів до масштабування рішень «розумних фабрик» у межах усієї корпорації. На цьому етапі ТНК має вирішити дві взаємопов'язані задачі: по-перше, перетворити успішні практики пілотних майданчиків на стандартизовані рішення, придатні до тиражування в різних країнах і організаційних контекстах; по-друге, інтегрувати дані та процеси на рівні всієї виробничої мережі. Формується корпоративний «референсний» набір архітектур, технологічних стеків, вимог до інтерфейсів і протоколів обміну даними, а також типові моделі організації виробничих процесів. Паралельно створюються центри експертизи, відповідальні за підтримку впровадження, управління змінами й навчання персоналу на всіх майданчиках, що переходять до формату «розумних фабрик».

Масштабування неминуче супроводжується переглядом організаційної структури та управлінських практик. Якщо на етапі пілота основний фокус робиться на локальній команді проєкту, то на етапі тиражування критичним стає формування загально корпоративної системи управління цифровою трансформацією: чіткий розподіл ролей між центральним офісом, регіональними структурами й окремими заводами, встановлення єдиних принципів пріоритизації інвестицій, синхронізація планів модернізації обладнання та ІТ-інфраструктури. Одночасно посилюється вимога до сумісності й масштабованості рішень: ТНК змушена обмежувати різноманітність використовуваних платформ і постачальників, щоб уникнути надмірної фрагментації технологічного ландшафту та зростання витрат на інтеграцію. У цьому контексті дорожня карта (див. рис 3.1) слугує інструментом узгодження технологічних, організаційних та кадрових рішень між етапами пілотування й масштабування. Структуру ключових рішень та інструментів етапу масштабування рішень «розумних фабрик» у межах транснаціональної корпорації наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Ключові елементи етапу масштабування рішень «розумних фабрик» у межах ТНК*

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
Стандартизація рішень і архітектур	Уніфікація технічних рішень, архітектур, протоколів інтеграції та вимог до даних на рівні корпорації	Чи визначено корпоративні стандарти платформ, протоколів, інтерфейсів? Які рішення визнано «референсними»?	Набір стандартизованих рішень, придатних до тиражування на різних майданчиках
Планування хвиль масштабування	Визначення пріоритетних заводів/ділянок для поетапного тиражування рішень, узгодження графіка впровадження	За якими критеріями обираються наступні майданчики? Який графік хвильового масштабування?	Дорожня карта розгортання «розумних фабрик» у межах усієї виробничої мережі
Інтеграція даних і систем управління	Побудова єдиного інформаційного контуру: інтеграція локальних рішень із корпоративними системами (ERP, SCM, PLM тощо)	Чи забезпечено обмін даними між заводами та корпоративним рівнем? Чи уникнуто дублювання й «островів» даних?	Єдиний цифровий контур управління виробництвом і ланцюгами постачання
Організаційна структура та управління трансформацією	Формалізація ролей і відповідальності: трансформаційний офіс, центри експертизи, локальні команди змін	Хто відповідає за координацію масштабування? Чи діють центри компетенцій? Як підтримується обмін досвідом між майданчиками?	Стійка система управління цифровою трансформацією на корпоративному рівні
Управління інвестиціями та ефектами	Координація інвестицій у технології, моніторинг досягнутих ефектів і коригування планів масштабування	Які проєкти дають найбільший ефект? Чи відповідають фактичні результати очікуванім?	Оптимізований портфель проєктів і зворотний зв'язок для подальших хвиль масштабування

*Джерело: складено автором за [59; 8]

Логічним завершенням трансформації стає формування глобальної мережі «розумних фабрик» у складі ланцюгів створення вартості ТНК. На цьому етапі окремі майданчики перестають розглядатися як відносно автономні одиниці і сприймаються як вузли єдиної цифрової системи, що забезпечує обмін даними, координацію виробничих планів, оптимізацію потоків матеріалів і компонентів у масштабі всієї корпорації. Важливо не лише тиражувати однакові технологічні

рішення, а й диференціювати ролі окремих заводів: одні виступають як «пілотні» та інноваційні центри, інші спеціалізуються на високоефективному масовому виробництві, треті забезпечують гнучкість і близькість до кінцевого споживача [21; 60]. Такий розподіл ролей підсилюється використанням спільних цифрових платформ і хмарних сервісів, які дозволяють у режимі реального часу зіставляти завантаження потужностей, доступність ресурсів та геополітичні ризики.

У глобальній мережі «розумних фабрик» особливого значення набуває інтеграція з постачальниками та клієнтами. На відміну від традиційних ланцюгів постачання, де інформаційні потоки часто є фрагментованими та інерційними, цифрові платформи дають змогу черпати дані про попит, запаси та виробничі обмеження з багатьох ланок одночасно. Це створює передумови для спільного планування, скорочення коливального ефекту в ланцюгах постачання (ефект «bullwhip») та переходу до більш стійких і гнучких моделей постачання [61]. У такій конфігурації «розумні фабрики» стають не лише внутрішнім інструментом оптимізації, а й ключовим елементом конкурентної стратегії ТНК на міжнародних ринках, дозволяючи швидше реагувати на збої у постачанні, коливання попиту та регуляторні зміни. Основні напрями формування та розвитку глобальної мережі «розумних фабрик» у ланцюгах створення вартості ТНК узагальнено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Ключові елементи етапу формування глобальної мережі «розумних фабрик» у ланцюгах створення вартості ТНК*

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
Розподіл ролей виробничих майданчиків	Визначення спеціалізації заводів у мережі (пілотні/інноваційні центри, масове виробництво, гнучкі майданчики, близькі до споживача)	Які майданчики виконують функцію «фабрик-майданчиків» для інновацій? Де зосереджене високоефективне масове виробництво?	Збалансована мережа «розумних фабрик» із чітко визначеними ролями окремих заводів
Інтеграція з постачальниками та клієнтами	Розвиток цифрових каналів обміну даними з ключовими постачальниками й	Які контрагенти інтегровані в цифрові платформи? Чи використовується	Підвищена прозорість ланцюгів постачання та

Напрямок аналізу / дій	Зміст оцінювання та основні дії	Приклади показників / запитань	Очікуваний результат
	клієнтами, спільне планування попиту та виробництва	спільне планування та прозорість запасів?	скорочення коливань попиту
Єдині цифрові платформи й стандарти даних	Використання спільних платформ для планування, моніторингу та аналітики, уніфікація форматів і вимог до даних у глобальній мережі	Чи використовуються єдині платформи для управління виробництвом і ланцюгами постачання? Чи узгоджені формати та моделі даних?	Суцільний інформаційний простір для прийняття рішень у масштабі всієї ТНК
Глобальна координація та стійкість мережі	Узгодження виробничих планів, перерозподіл завантаження потужностей, управління ризиками (геополітичними, логістичними, регуляторними)	Чи є сценарії перенесення виробництва між майданчиками? Як враховуються геополітичні та регуляторні ризики?	Підвищена стійкість і гнучкість глобальної мережі «розумних фабрик» до зовнішніх шоків
Безперервне вдосконалення та обмін знаннями	Створення механізмів поширення кращих практик між майданчиками, глобальні спільноти практиків, спільні програми розвитку	Як фіксуються та тиражуються успішні рішення? Чи існують міжнародні команди/спільноти з обміну досвідом?	Сформована культура безперервного вдосконалення в межах глобальної мережі «розумних фабрик»

*Джерело: складено автором за [12]

Разом з тим реалізація описаної дорожньої карти пов'язана з низкою ризиків, які ТНК повинні враховувати на всіх етапах трансформації. Один із ключових блоків ризиків стосується людського капіталу: дефіцит цифрових і міждисциплінарних компетентностей, опір змінам з боку персоналу, нерівномірний розподіл навичок між країнами та майданчиками. Міжнародні дослідження підкреслюють, що без системних програм навчання та перекваліфікації проекти цифрової трансформації часто втрачають динаміку та зіштовхуються із внутрішнім спротивом [5]. Без програм підготовки та перепідготовки й створення привабливих кар'єрних траєкторій для фахівців, які працюють із даними, автоматизованими системами й кіберфізичним обладнанням, проекти «розумних фабрик» ризикують залишитися технічно

реалізованими, але організаційно неповністю інтегрованими в систему управління підприємством.

Другий блок ризиків пов'язаний із кібербезпекою та захистом даних. Чим вищий рівень зв'язності між виробничими майданчиками, тим більш уразливою стає корпорація до кібератак, збоїв у роботі мережевої інфраструктури та витоків чутливої інформації. Для глобальної мережі «розумних фабрик» особливо небезпечною є можливість каскадних збоїв, коли компрометація одного вузла призводить до доміно-ефекту в інших ланках виробничого ланцюга. Це вимагає інвестування в багаторівневі системи захисту, сегментацію мереж, регулярні аудити кіберстійкості й відпрацювання сценаріїв реагування на інциденти. До цього додаються інвестиційні ризики, пов'язані з високою капіталомісткістю проєктів «розумних фабрик», невизначеністю регуляторного середовища в окремих юрисдикціях та можливими коливаннями глобального попиту.

Таким чином, успішна реалізація дорожньої карти для ТНК можлива лише за наявності низки ключових передумов. По-перше, потрібне послідовне лідерство з боку вищого менеджменту, яке забезпечує сталість стратегічного курсу та готовність до інвестицій у цифрову інфраструктуру навіть за умов короткострокового тиску на фінансові показники. По-друге, необхідно створити механізми партнерства з технологічними компаніями, університетами й державними інституціями, що дозволяють розділити ризики й прискорити поширення знань. По-третє, важливо враховувати регуляторні й інституційні умови країн присутності: без базових гарантій захисту інвестицій, підтримки цифрової інфраструктури та розвитку людського капіталу навіть найдосконаліші внутрішні стратегії ТНК можуть виявитися малоефективними. Саме аналіз того, якою мірою ці умови виконуються у країнах, що розвиваються, і зокрема в Україні, становить предмет наступного підрозділу 3.3, де буде розглянуто можливості інтеграції технологій «розумних фабрик» у специфічному контексті національної економіки.

3.3 Можливості інтеграції технологій «розумних фабрик» у країнах, що розвиваються

Поширення технологій «розумних фабрик» виходить за межі вузького кола розвинених країн і лідерів Global Lighthouse Network, стаючи предметом стратегічного вибору для економік, що розвиваються. У попередніх підрозділах основну увагу було зосереджено на транснаціональних корпораціях та глобальних промислових лідерах, які формують дорожні карти впровадження «розумних фабрик» на корпоративному рівні. У цьому підрозділі фокус зміщується до країн, що розвиваються, насамперед України, а також до порівняльних кейсів Туреччини й В'єтнаму. Мета полягає в тому, щоб окреслити, за яких передумов і за якими траєкторіями такі країни можуть інтегруватися у глобальні мережі «розумних фабрик», використовуючи їх як інструмент наздоганяючого розвитку, а не лише як точкові проекти в межах окремих ТНК.

Глобальні інституції пропонують різні підходи до класифікації країн. Міжнародний валютний фонд у «World Economic Outlook» поділяє економіки на дві великі групи – розвинені економіки та країни з ринками, що формуються та країни, що розвиваються, не застосовуючи жорстких формальних критеріїв, а виходячи з практичних потреб аналізу [62]. Світовий банк, у свою чергу, класифікує країни за рівнем валового національного доходу на душу населення на чотири групи: країни з низьким рівнем доходу, з нижчим за середній рівнем доходу, з вищим за середній рівнем доходу та з високим рівнем доходу, оновлюючи ці межі щороку. У 2024 р. Україна була переведена до групи країн з вищим за середній рівнем доходу, разом з Алжиром, Іраном і Монголією, на підставі досягнення показника валового національного доходу на душу населення близько 5070 дол. США [63; 64]. У такому формальному сенсі Україна, Туреччина та В'єтнам належать до групи країн, що розвиваються або ринків, що формуються, хоча їхні промислові профілі та моделі інтеграції у глобальні ланцюги вартості суттєво різняться.

Для країн, що розвиваються, технології «розумних фабрик» мають подвійний характер. З одного боку, вони відкривають можливість так званого “leapfrogging” – стрибка до вищого рівня продуктивності, інноваційності та екологічної стійкості, мінаючи певні етапи «традиційної» індустріалізації. Це особливо важливо в умовах, коли конкуренція за промислові інвестиції загострюється, а вимоги до екологічних і соціальних стандартів у глобальних ланцюгах поставок зростають. З іншого боку, впровадження «розумних фабрик» передбачає наявність розвиненої інфраструктури даних та енергетики, інституційної передбачуваності, доступу до капіталу і кваліфікованого людського капіталу. У разі дефіциту цих передумов технологічний розрив із розвиненими економіками може не скорочуватися, а, навпаки, посилюватися. Саме тому аналіз можливостей інтеграції «розумних фабрик» у країнах, що розвиваються, потребує поєднання технологічного, інституційного та структурного вимірів.

Показовими для України є два орієнтири – Туреччина та В'єтнам, які часто розглядаються як приклади успішної, хоча й різноспрямованої індустріалізації. Економіка Туреччини в оглядах МВФ та Світового банку описується як “країна з ринком, що формується” та “країна з вищим за середній рівнем доходу”, а в аналітичних класифікаціях – як “нова індустріальна країна”, тобто новоіндустріальна країна з диверсифікованою промисловою базою та значною часткою обробної промисловості у ВВП. За даними Світового банку, загальна частка промисловості (включно з будівництвом) у ВВП Туреччини перевищує 30 %, а обробна промисловість формує понад 20 % доданої вартості [65]. Така структура створює сприятливий ґрунт для поетапного впровадження рішень Індустрії 4.0, зокрема через організовані промислові зони та тісну інтеграцію з європейськими ланцюгами створення вартості.

В'єтнам, навпаки, репрезентує модель експортно-орієнтованої індустріалізації, де ключову роль у створенні промислової бази відіграли транснаціональні корпорації. Світовий банк відзначає, що за останні три десятиліття В'єтнам трансформувався з однієї з найбідніших країн світу у “країну з нижчим за середній рівнем доходу” і став однією з найбільш

динамічних економік Східної Азії [66]. Індустріальний розвиток цієї країни значною мірою пов'язаний із створенням великих виробничих кластерів у секторах електроніки, текстилю, взуття, де провідні ТНК (зокрема, Samsung, LG) виступають як якорні інвестори у виробничі комплекси з високим рівнем автоматизації й цифровізації. Додатково, нещодавнє підвищення статусу В'єтнаму до “ринку, що розвивається другого рівня” у класифікації FTSE Russell підкреслює його зростаючу роль у глобальних фінансових та виробничих мережах [67].

Таким чином, Туреччина і В'єтнам задають два різні, але корисні для України орієнтири. Перша демонструє, як країна з розвиненою промисловою базою, що належить до групи «нових індустріальних», може поєднувати участь у європейських ланцюгах доданої вартості з модернізацією виробничих потужностей на засадах Індустрії 4.0. Другий кейс ілюструє, як країна з нижчим рівнем доходів, але сприятливим інвестиційним середовищем, здатна використати прихід ТНК для створення сучасних виробничих хабів, у тому числі з елементами «розумних фабрик». Порівняльні передумови інтеграції технологій «розумних фабрик» у Туреччині, В'єтнамі та Україні доцільно узагальнити в табл. 3.6, що дозволяє структуровано порівняти їх класифікацію за міжнародними інституціями, роль промисловості, рівень інтеграції у глобальні ланцюги вартості, а також ключові сильні сторони та обмеження для подальшого розвитку.

Таблиця 3.6 – Порівняльні передумови інтеграції технологій «розумних фабрик» у Туреччині, В'єтнамі та Україні*

Країна	Промисловість і роль ТНК	Інтеграція в глобальні ланцюги створення вартості	Ключові сильні сторони	Основні виклики
Туреччина	Значна частка промисловості у ВВП, розвинене машинобудування, автомобілебудування,	Глибока інтеграція в європейські ланцюги завдяки	Диверсифікована промислова база, розвинена логістика, великий внутрішній ринок.	Макроекономічна й політична нестабільність, інституційні ризики,

Країна	Промисловість і роль ТНК	Інтеграція в глобальні ланцюги створення вартості	Ключові сильні сторони	Основні виклики
	електроніка; помітна присутність ТНК.	митному союзу з ЄС та вигідному розташуванню між Європою і Близьким Сходом.		залежність від імпорту енергоносіїв.
В'єтнам	Промисловість орієнтована на експорт; ключова роль ТНК у кластерах електроніки, текстилю та взуття.	Сильна включеність в азійські виробничі ланцюги, широка мережа угод про вільну торгівлю.	Високі темпи зростання, конкурентоспроможна вартість робочої сили, сприятливий інвестиційний клімат.	Залежність від ТНК, обмежені власні дослідження й розробки, інфраструктурні та екологічні обмеження.
Україна	Вагома, але структурно застаріла промисловість (металургія, хімія, харчова промисловість); частина потужностей втрачена або потребує модернізації.	Потенціал глибшої інтеграції в європейські ланцюги створення вартості на основі Угоди про асоціацію з ЄС та географічної близькості.	Потужний людський капітал в ІТ, інженерії та природничо-математичних і технічних науках; європейський вектор розвитку.	Безпекові ризики, зношеність і пошкодження інфраструктури, інституційна нестабільність, обмежений доступ до капіталу, вплив кадрів.

*Джерело: складено автором за [65; 66]

Вихідні умови для інтеграції технологій «розумних фабрик» в Україні визначаються поєднанням структурних обмежень і нетипових для країн, що розвиваються сильних сторін. З одного боку, промисловий сектор загалом характеризується високою зношеністю основних фондів, значною часткою ресурсомістких галузей та концентрацією підприємств у традиційних виробничих кластерах, орієнтованих на сировинний та напівфабрикатний експорт. До цього додаються наслідки масштабних безпекових шоків і руйнування інфраструктури, що спричинили релокацію частини бізнесу, втрату окремих виробничих майданчиків і зростання ризиків для довгострокових

інвестицій. У сукупності це звужує простір для швидкого розгортання капіталомістких проєктів «розумних фабрик» на базі існуючих потужностей без суттєвого оновлення виробничого капіталу.

З іншого боку, Україна має для країн, що розвиваються нетипово сильний людський та інтелектуальний капітал у сферах ІТ, інженерії та природничо-математичних і технічних наук. Розвиток експортно орієнтованого ІТ-сектору, участь українських фахівців у міжнародних проєктах цифровізації виробництв, а також наявність університетських та наукових шкіл у галузях машинобудування, автоматизації, кіберфізичних систем створюють підґрунтя для формування власних рішень у сфері «розумних фабрик». У порівнянні з Туреччиною, яка спирається на відносно цілісну та добре інтегровану у європейські ланцюги створення вартості промислову базу, і В'єтнамом, де якорні транснаціональні корпорації відіграють провідну роль у побудові сучасних виробничих хабів, Україна має більш асиметричний профіль: поєднання фрагментованої та частково застарілої матеріальної інфраструктури з високим рівнем компетентностей у цифрових та інженерних сферах. Саме ця асиметрія визначає, що інтеграція «розумних фабрик» в українську економіку має спиратися не лише на модернізацію фізичного виробництва, але й на максимальне використання потенціалу ІТ-сектору та інноваційних екосистем.

У цьому контексті інтеграцію технологій «розумних фабрик» в Україні доцільно розглядати не як єдину лінійну траєкторію, а як сукупність кількох можливих напрямів руху, що відрізняються стартовими ресурсами, глибиною залучення міжнародних партнерів та горизонтом очікуваних результатів. Один з таких напрямів пов'язаний із розвитком проєктів за участю транснаціональних корпорацій, подібно до моделі В'єтнаму, де локалізація виробництв глобальних компаній стала каталізатором модернізації промислової бази. Для України це може означати створення «якірних» виробничих майданчиків у галузях, де країна вже має або потенційно може отримати відносні переваги в ланцюгах створення вартості: виробництво комплектувальних для автомобільної промисловості, електротехнічної продукції, складного промислового

обладнання, продукції оборонно-промислового комплексу, переробки сільськогосподарської сировини. Ключовими передумовами такої траєкторії є прогнозованість регуляторного середовища, наявність придатних майданчиків з відповідною інфраструктурою, спроможність швидко формувати й навчати виробничі колективи, а також вбудованість у міжнародні логістичні маршрути.

Інший напрям пов'язаний із формуванням регіональних промислових кластерів, близьких за логікою до турецьких організованих промислових зон, де в межах одного простору концентруються підприємства суміжних ланок виробничого ланцюга. У таких кластерах окремі українські підприємства можуть виконувати роль базових майданчиків для впровадження рішень «розумних фабрик», забезпечуючи підвищення ефективності, якості та екологічних стандартів не тільки на рівні окремого заводу, а й у межах усього ланцюга постачання. Потенційними напрямками для кластеризації можуть бути машинобудування, переробка аграрної продукції, хімічна промисловість, виробництво будівельних матеріалів, де вже сформувалися локальні осередки компетентностей і зберігається значуща частка промислової зайнятості. При цьому важливу роль відіграє участь органів місцевого самоврядування та регіональних органів влади у створенні сприятливого середовища для інвестицій, розвитку інфраструктури й підготовки кадрів.

Третьою можливою траєкторією є розвиток цифрових індустріальних парків і технопарків, у межах яких поєднуються виробничі потужності, науково-дослідні підрозділи та компанії, що спеціалізуються на цифрових рішеннях для промисловості. Для України така модель є особливо привабливою з огляду на високий рівень розвитку ІТ-сектору та наявність інженерно-технічних шкіл. У рамках цифрових індустріальних парків «розумна фабрика» розглядається не як ізольований об'єкт, а як складова ширшої інноваційної екосистеми, де розробляються та впроваджуються рішення з промислового Інтернету речей, збору й аналізу даних, моделювання виробничих процесів, створення цифрових двійників обладнання та виробів. Такий підхід дає змогу одночасно розвивати

виробництво та експорт інтелектуальних послуг, посилюючи зв'язок між промисловістю й сектором інформаційних технологій.

Четверта траєкторія пов'язана з розбудовою партнерських моделей формату «транснаціональні корпорації – українські інтегратори», коли українські ІТ- та інжинірингові компанії виступають розробниками й постачальниками рішень для «розумних фабрик» як на внутрішньому ринку, так і за його межами. У цьому випадку інтеграція технологій «розумних фабрик» в Україні відбувається паралельно з експортом українських компетентностей, що посилює позиції країни у глобальних мережах створення вартості не лише як виробничого майданчика, а й як постачальника знань і технологій. Основні можливі траєкторії інтеграції технологій «розумних фабрик» в Україні, їх коротку характеристику, міжнародні орієнтири (зокрема досвід Туреччини та В'єтнаму), ключові умови реалізації та потенційні ризики доцільно систематизувати в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Можливі траєкторії інтеграції технологій «розумних фабрик» в Україні*

Траєкторія	Коротка характеристика	Міжнародні орієнтири	Ключові умови реалізації в Україні
Через транснаціональні компанії та глобальні виробничі мережі	Локалізація виробництв ТНК на українських майданчиках із впровадженням рішень «розумних фабрик» у вибраних галузях (комплектувальні, електротехніка, переробка, оборонно-промисловий комплекс).	В'єтнам: промислові зони, орієнтовані на експорт, з «якірними» інвесторами серед ТНК.	Інвестиційні гарантії, передбачуване регуляторне середовище, якісна інфраструктура, доступ до кваліфікованої робочої сили.
Через регіональні промислові кластери	Створення кластерів (машинобудування, агропереробка, хімія), де окремі підприємства стають базовими «розумними фабриками» для всього виробничого ланцюга.	Туреччина: організовані промислові зони, інтегровані в ланцюги постачання для ринку ЄС.	Підтримка з боку держави й громад, розвиток інфраструктури, координація підприємств усередині кластерів, програми підготовки кадрів.

Траєкторія	Коротка характеристика	Міжнародні орієнтири	Ключові умови реалізації в Україні
Через цифрові індустріальні парки та технопарки	Поєднання виробництва, наукових підрозділів та компаній з розроблення цифрових рішень для промисловості в одному просторі.	Азійські технологічні та індустріальні парки з фокусом на електроніку й високі технології.	Створення спеціальних режимів для інноваційних парків, інвестиції в цифрову інфраструктуру, залучення університетів і наукових установ.
Партнерські моделі «транснаціональні компанії – українські інтегратори»	Українські ІТ- та інженерні компанії розробляють і впроваджують рішення для «розумних фабрик» усередині країни та за кордоном.	Участь постачальників програмних і інженерних рішень у проєктах модернізації виробництв у Європі та Азії.	Підтримка експорту послуг, захист прав інтелектуальної власності, доступ до міжнародних ринків, розвиток компетентностей у промисловій автоматизації.

*Джерело: складено автором за []

Реалізація окреслених траєкторій неможлива без виконання низки критично важливих умов, що стосуються інституційного середовища, інфраструктури, людського капіталу та доступу до фінансових ресурсів. З інституційного погляду необхідно забезпечити стале нормативно-правове поле для інвестицій у високотехнологічні виробництва, передбачуваність регуляторних рішень, ефективні механізми захисту прав власності та виконання контрактів, а також послідовну промислову й інноваційну політику, узгоджену з вимогами та стандартами Європейського Союзу. В інфраструктурному вимірі йдеться про модернізацію та підвищення стійкості енергетичної системи, розвиток цифрової інфраструктури (волоконно-оптичні мережі, центри обробки даних, спеціалізовані мережі для промислового зв'язку), удосконалення транспортно-логістичної мережі. У площині людського капіталу ключового значення набувають програми підготовки та перепідготовки кадрів для промисловості, розвиток дуальної освіти, посилення природничо-математичних і технічних напрямів у системі вищої та професійної освіти, а також заходи щодо утримання й повернення висококваліфікованих спеціалістів. Не менш важливим

є формування інструментів довгострокового фінансування проєктів «розумних фабрик», включно з участю міжнародних фінансових організацій, спеціальними програмами підтримки інвестицій та страхуванням політичних і комерційних ризиків. Ключові блоки умов реалізації проєктів «розумних фабрик» в Україні та основні ризики у разі їх невиконання доцільно узагальнити в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Ключові умови реалізації проєктів «розумних фабрик» в Україні та основні ризики*

Блок умов	Необхідні кроки / інструменти	Ризики у разі нереалізації
Інституційні	Посилення захисту прав власності та інвесторів; передбачувана регуляторна політика; запровадження цілісної промислової й інноваційної політики, узгодженої зі стандартами ЄС.	Зниження інвестиційної привабливості; переорієнтація проєктів «розумних фабрик» до інших країн; збереження фрагментарних, разових ініціатив без системного ефекту.
Інфраструктурні	Модернізація та підвищення стійкості енергетичної системи; розвиток цифрової інфраструктури (мережі передачі даних, центри обробки даних); поліпшення транспортно-логістичної мережі.	Зростання виробничих витрат і перебоїв; обмеження масштабування проєктів; втрата конкурентних переваг у порівнянні з країнами з розвиненішою інфраструктурою.
Людський капітал	Програми підготовки та перепідготовки кадрів для Індустрії 4.0; розвиток дуальної освіти; посилення природничо-математичних і технічних спеціальностей; заходи щодо утримання й повернення фахівців.	Дефіцит кваліфікованих кадрів; уповільнення впровадження технологій; посилення «витоку мізків» та відставання від міжнародних практик організації виробництва.
Фінансові	Створення інструментів довгострокового фінансування; залучення міжнародних фінансових організацій; програми спільного фінансування з ЄС; механізми страхування інвестиційних ризиків.	Нестача ресурсів для модернізації виробництва; концентрація проєктів у вузькому колі компаній; неможливість запуску капіталомістких проєктів «розумних фабрик».

*Джерело: складено автором за [4]

Поряд із необхідними умовами слід виокремити й ризики, які можуть суттєво обмежити масштаби інтеграції технологій «розумних фабрик» в українську економіку. До таких ризиків належать затягування або непослідовність структурних реформ, надмірна регуляторна мінливість,

недостатній рівень координації між центральними та місцевими органами влади у питаннях промислової й інноваційної політики, а також погіршення інвестиційного клімату на тлі посилення конкуренції з боку інших країн, що розвиваються. Окрему групу становлять ризики, пов'язані з впливом кваліфікованих кадрів, демографічними тенденціями та регіональними диспропорціями у розвитку інфраструктури. Невирішеність цих проблем може призвести до того, що проекти «розумних фабрик» залишатимуться поодинокими та не формуватимуть відчутного мультиплікативного ефекту для національної економіки.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що Україна, як і Туреччина та В'єтнам, формально належить до групи країн, що розвиваються, але поєднує риси нової індустріальної економіки з характеристиками посттрансформаційної та вразливої до шоків промислової структури. Це створює з одного боку додаткові бар'єри для включення в глобальні мережі «розумних фабрик», а з іншого – відкриває специфічні можливості, пов'язані з післявоєнною відбудовою, поглибленням інтеграції з Європейським Союзом та мобілізацією наявного людського й інтелектуального потенціалу. Масштаб і глибина ефектів від впровадження технологій «розумних фабрик» залежатимуть від того, наскільки послідовно будуть реалізовані структурні реформи, забезпечено виконання зазначених умов та мінімізовано окреслені ризики, що в підсумку визначатиме довгострокову конкурентоспроможність української економіки у глобальному середовищі.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі теоретично обґрунтовано сутність «розумних фабрик» як ключового елементу сучасної цифрової трансформації промисловості та визначено їхню роль у формуванні міжнародної конкурентоспроможності підприємств і національних економік. Одержані в процесі дослідження результати та їх узагальнення дають змогу сформулювати такі висновки:

1. Проведено ретроспективний аналіз еволюції промислового розвитку, умовно поділеного на чотири послідовні індустріальні революції, що ілюструє довгострокову траєкторію переходу від механізації до даноцентричних виробничих систем. Перша та друга революції заклали матеріально-технологічний базис через впровадження парової енергії та електрифікації з акцентом на конвеєрне та масове виробництво, тоді як третя революція забезпечила фрагментарну цифрову автоматизацію окремих ланок виробництва та сприяла формуванню глобальних ланцюгів створення вартості. З початком XXI століття четверта промислова революція здійснила якісний зсув, інтегрувавши фізичні й цифрові виміри за рахунок кіберфізичних систем, промислового Інтернету речей, штучного інтелекту та хмарних обчислень. Це створило комплексні технологічні, організаційні та інституційні передумови для появи «розумних фабрик» — наскрізно під'єднаних виробничих екосистем. Таким чином, історична еволюція демонструє послідовний перехід джерел конкурентних переваг від механічної потужності до здатності керувати складними інтегрованими системами, що є ключовою ознакою сучасної парадигми «розумного виробництва» та його впливу на міжнародну конкурентоспроможність.

2. Проаналізовано роль цифрових технологій як фундаменту функціонування та еволюції «розумних фабрик». З'ясовано, що їхня ефективність ґрунтується не на розрізнених рішеннях, а на цілісній багаторівневій архітектурі, яка об'єднує фізичні активи та цифрові системи через

замкнений контур управління даними. Систематизовано ключові компоненти цієї архітектури, зокрема промисловий Інтернет речей, штучний інтелект, аналітику даних, цифрові двійники та хмарно-периферійні обчислення, які забезпечують прозорість процесів, автономізацію рішень і гнучкість виробництва. Встановлено, що інтеграція цих технологій трансформує традиційні виробничі метрики, запроваджуючи динамічні показники ефективності в реальному часі та сприяючи переходу до нових бізнес-моделей. Підкреслено критичне значення стандартизації, кібербезпеки та організаційних змін, зокрема розвитку людського капіталу, для успішного масштабування цифрових рішень. Таким чином доведено, що цифрові технології виступають не лише технічним інструментом, а й стратегічним драйвером, що формує динамічні здібності підприємств та їхню конкурентоспроможність у глобальних ланцюгах створення вартості.

3. Обґрунтовано концептуальне бачення «розумних фабрик» не лише як технологічної інновації, а як структурного елемента глобальної конкурентоспроможності, що забезпечує фундаментальний зсув від переваг на основі дешевих ресурсів до переваг, базованих на інтеграції цифрових екосистем. Встановлено, що на мікрорівні впровадження інтелектуальних виробничих систем трансформує традиційну модель конкуренції, доповнюючи критерії вартості та якості вимогами гнучкості, кастомізації та простежуваності, а також змінює структуру капіталу через зростання ролі нематеріальних активів. Доведено, що на макроекономічному рівні інтенсивність поширення таких виробництв є індикатором спроможності країни інтегруватися у високомаржинальні сегменти глобальних ланцюгів створення вартості та забезпечувати стійкість національної економіки до зовнішніх шоків. Визначено критичну роль розумного виробництва у досягненні цілей сталого розвитку через механізми підвищення енергоефективності та декарбонізації промисловості. Зроблено висновок, що успішна реалізація потенціалу «розумних фабрик» вимагає системної державної політики та розвитку інституційного середовища

для нівелювання ризиків цифрового розриву та забезпечення інклюзивного економічного зростання.

4. Досліджено комплексний ландшафт глобальних чинників, що визначають динаміку впровадження «розумних фабрик». Виявлено, що основними драйверами є вичерпання потенціалу традиційних факторів зростання, необхідність радикального підвищення продуктивності та вагомий потенційний позитивний вплив на економіку, а також вимоги щодо енергоефективності, масової кастомізації та стійкості ланцюгів постачання. Натомість масштабування стримується системними бар'єрами: на мікрорівні — високими початковими інвестиціями, «пасткою пілотних проєктів», дефіцитом цифрових талантів та проблемами кібербезпеки; на макрорівні — глобальним «цифровим розривом», нерівномірністю технологічного доступу та інфраструктурними обмеженнями в країнах, що розвиваються. Систематизовано ці взаємовпливи, що дозволяє стверджувати: успіх цифрової трансформації залежить не лише від технологій, а й від спроможності країн та компаній синхронізувати інвестиційні, кадрові та регуляторні стратегії для подолання структурних перешкод.

5. Проведено аналіз кращих міжнародних практик впровадження концепції «розумних фабрик» на прикладі п'яти глобальних лідерів — Bosch, Siemens, Tesla, Foxconn та BMW — що репрезентують різні сегменти високотехнологічного виробництва. Виявлено, що, незважаючи на спільне використання ключових технологій, таких як промисловий Інтернет речей, цифрові двійники та аналітика на основі штучного інтелекту, компанії реалізують відмінні стратегії для досягнення конкурентних переваг. Bosch та Siemens ефективно поєднують роль користувача й провайдера цифрових рішень, використовуючи власні заводи, зокрема завод Siemens в Амберзі, як полігони для тиражування архітектури цифрового підприємства, що забезпечує багатократне зростання продуктивності та мінімізацію дефектів. Натомість Tesla зосереджується на швидкому масштабуванні нової технологічної платформи через вертикально інтегровані «гігафабрики», Foxconn застосовує цифрову

платформу BEACON для гнучкості та стандартизації в контрактному виробництві, а BMW у концепції iFACTORY демонструє інтеграцію цифрового управління, екологічної сталості та масової кастомізації. Таким чином успіх «розумних фабрик» підтверджується значним покращенням операційних показників, що робить ці практики референтними моделями для формування національних стратегій конкурентоспроможності.

6. Здійснено комплексний порівняльний аналіз рівня цифровізації виробництва в США, Німеччині, Китаї та Південній Кореї, що охопив ключові кількісні індикатори та зміст національних стратегій розвитку «розумних фабрик». Показано суттєві відмінності у щільності роботизації: Південна Корея демонструє найвищі показники, Китай поєднує масштабну автоматизацію з інтенсивним розвитком промислових інтернет-платформ, а Німеччина й США застосовують власні моделі модернізації, які базуються відповідно на інституціоналізованих галузевих ініціативах та домінуванні цифрових сервісів. Проаналізовано динаміку глобального парку промислових роботів, виявлено національні особливості інтеграції хмарних технологій, аналітики даних та промислового Інтернету, а також описано сильні сторони й системні обмеження кожної країни. Узагальнення отриманих результатів дозволило визначити специфіку стратегічних підходів до цифрової трансформації промисловості та окреслити ключові чинники, що забезпечують різний рівень конкурентоспроможності провідних держав на світових ринках.

7. Проведено всебічний аналіз перспектив впровадження «розумних фабрик» із фокусом на їхній вплив на ефективність, інноваційність і сталий розвиток; сформовано інтегровану рамку оцінювання трьох взаємопов'язаних вимірів; уточнено ключові показники та механізми впливу на операційну результативність, скорочення часу виведення продуктів на ринок і зниження екологічного навантаження; а також описано послідовну дорожню карту для транснаціональних корпорацій — від діагностики до масштабування і формування глобальної мережі «розумних фабрик». Розроблено практичні рекомендації для транснаціональних корпорацій щодо підготовки пілотних

майданчиків, налаштування корпоративних стандартів і архітектур, організації центрів експертизи та механізмів управління змінами; проаналізовано основні ризики впровадження, включно з дефіцитом кадрів, кіберзагрозами та інвестиційною вразливістю. Окремо систематизовано можливі траєкторії інтеграції технологій «розумних фабрик» у країнах, що розвиваються (на прикладі Туреччини, В'єтнаму та України), виокремлено критичні умови успіху в інституційному, інфраструктурному, людському та фінансовому вимірах і окреслено політичні та організаційні пріоритети, реалізація яких визначатиме масштаби і тривалість конкурентних переваг у міжнародному бізнесі.

Разом з тим результати дослідження мають певні обмеження, пов'язані зі залежністю від доступності статистичних даних та динамізмом технологічних змін. Подальші наукові розвідки доцільно спрямувати на поглиблене кількісне моделювання ефектів впровадження «розумних фабрик» у ключових галузях української економіки, аналіз інституційних бар'єрів та розробку детальних дорожніх карт цифрової індустріалізації в умовах післявоєнної трансформації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Дерев'янка Ю. Нові можливості — неоекономіка. Як зробити Україну країною, сприятливою для бізнес-інновацій. URL: <https://derevyanko.io/program/nov-mozhlivost---neoeconomka> (дата зверення: 17.11.2025).
2. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, 2016. 184 p. ISBN: 978-1-944835-01-9. URL: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab> (дата зверення: 11.11.2025).
3. Черненко Н. О., Глущенко Я. І., Корогодова О. О., Моїсеєнко Т. Є. Аналіз використання технологій Індустрії від 1.0 до 5.0 у комунальному секторі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 4(83). С. 201–209. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.4.29 (дата зверення: 18.11.2025).
4. Вишневський В. П., Князєв С. І., Касперович Ю. В., Череватський Д. Ю. Смарт-промисловість: напрями становлення, проблеми і рішення : монографія. НАН України, Інститут економіки промисловості. Київ, 2019. 392 с. URL: https://iie.org.ua/wp-content/uploads/2020/04/2019-smart-promyslovist_napriamy-standovlennia-problemy-i-rishennia_compressed-1.pdf (дата зверення: 11.11.2025).
5. Caruso L. Digital Innovation and the Fourth Industrial Revolution: Epochal Social Changes? *AI & Society*. 2018. Т. 33, № 3. С. 379–392. URL: <https://doi.org/10.1007/s00146-017-0736-1> (дата зверення: 18.11.2025).
6. Wikipedia. Fourth Industrial Revolution. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution (дата зверення: 12.10.2025).
7. World Economic Forum. Global Lighthouse Network: Unlocking Sustainability through Fourth Industrial Revolution (4IR) Technologies. Geneva: World Economic Forum, 2021. 36 p. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network_Unlocking_Sustainability_Through_4IR.pdf (дата зверення: 11.10.2025).

8. Capgemini Research Institute. Smart Factories @ Scale. Paris: Capgemini, 2023. 60 p. URL: <https://www.capgemini.com/gb-en/insights/research-library/smart-factories-at-scale/> (дата зверення: 27.10.2025).

9. Ryalat M., ElMoaqet H., AlFaouri M. Design of a Smart Factory Based on Cyber-Physical Systems and Internet of Things towards Industry 4.0. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 17, Article 9923. MDPI, Basel. 20 p. DOI: 10.3390/app13179923 (дата зверення: 18.11.2025).

10. Lee E. A. Cyber-Physical Systems — Are Computing Foundations Adequate? Department of EECS, University of California, Berkeley, 2006. 22 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/250017682_Cyber-Physical_Systems_-_Are_Computing_Foundations_Adequate (дата зверення: 11.11.2025).

11. Deloitte. Smart Manufacturing Overview 2024. New York: Deloitte Development LLC, 2024. 40 p. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/deloitte-smart-manufacturing-overview-2024.pdf> (дата зверення: 11.10.2025).

12. Rockwell Automation. How to Build a Connected Enterprise in Manufacturing. Milwaukee: Rockwell Automation, 2024. URL: <https://www.rockwellautomation.com/en-id/company/news/blogs/connected-enterprise.html> (дата зверення: 27.10.2025).

13. ISO. ISO 23247:2021 — Digital Twin Framework for Manufacturing. Geneva: ISO, 2021. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23247:-1:ed-1:v1:en> (дата зверення: 22.10.2025).

14. Lifecycle Insights, Siemens Digital Industries Software. The 2022 Digital Twin Report: Examining Digital Transformation Maturity for Product Design and Production Engineering. Munich, 2022. 38 p. URL: <https://blogs.sw.siemens.com/wp-content/uploads/sites/41/2022/05/The-2022-Digital-Twin-Report-by-Lifecycle-Insights.pdf> (дата зверення: 27.10.2025).

15. European Commission. Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2021. 47 p. DOI: 10.2777/308407. (дата зверення: 22.10.2025).

16. IEC. IEC 62443 (series): Industrial Communication Networks — IT Security for Networks and Systems. Geneva: IEC, 2021. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6028> (дата зверення: 22.10.2025).

17. NIST. NIST IR 8183r2 (ipd): Cybersecurity Framework Manufacturing Profile. Gaithersburg, MD: NIST, 2023. 198 p. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8183r2.ipd.pdf> (дата зверення: 22.10.2025).

18. McKinsey & Company. The State of Organizations 2023. New York: McKinsey, 2023. 84 p. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/people-and-organizational-performance/our-insights/the-state-of-organizations-2023> (дата зверення: 22.10.2025).

19. ASUS IoT. ASUS IoT Drives Smart Factory Development through AI. URL: <https://iot.asus.com/kr/resources/casestudies/drive-smart-factory-development-through-ai/> (дата зверення: 17.11.2025).

20. World Bank. Digital Progress and Trends Report 2023. Washington, DC: World Bank, 2024. 222 p. DOI: 10.1596/978-1-4648-2049-6. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/40970> (дата зверення: 22.10.2025).

21. World Economic Forum in collaboration with McKinsey & Company. Global Lighthouse Network: Insights from the Forefront of the Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum, December 2019. 54 p. URL: https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Lighthouse_Network_Insights_2019.pdf (дата зверення: 11.10.2025).

22. United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). The Future of Industrialization in a Post-Pandemic World. Industrial Development Report 2022. Vienna: UNIDO, 2022. URL: <https://www.unido.org/news/future-industrialization-post-pandemic-world-industrial-development-report-2022> (дата зверення: 11.10.2025).

23. World Economic Forum, UNIDO, University of Cambridge. The New Era of Industrial Strategies: Tackling Grand Challenges through Public-Private

Collaboration. Geneva: World Economic Forum, January 2024. 54 p. URL: <https://www.weforum.org/publications/the-new-era-of-industrial-strategies> (дата зверення: 11.10.2025).

24. World Economic Forum; Kearney. Beyond Cost: Country Readiness for the Future of Manufacturing and Supply Chains. Geneva: WEF, 2024. 63 p. URL: <https://www.weforum.org/publications/beyond-cost-country-readiness-for-manufacturing-and-supply-chains/> (дата зверення: 27.10.2025).

25. OECD. OECD Compendium of Productivity Indicators 2024. Paris: OECD Publishing, 2024. 64 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2024/02/oecd-compendium-of-productivity-indicators-2024_d224133f/b96cd88a-en.pdf (дата зверення: 22.10.2025).

26. Accenture Research. Powered for Change: Industrial Decarbonization. London: Accenture, 2024. 58 p. URL: <https://www.accenture.com/content/dam/accenture/final/accenture-com/document-2/Accenture-Powered-for-Change-Report-2024.pdf> (дата зверення: 11.10.2025).

27. OECD. Green Industrial Policies for the Net-Zero Transition. OECD Net Zero+ Policy Papers No. 2. Paris: OECD, 2024. 27 p. URL: <https://www.oecd.org/en/about/programmes/net-zero-building-climate-and-economic-resilience.html> (дата зверення: 22.10.2025).

28. McKinsey & Company. Is Industrial Automation Headed for a Tipping Point? Frankfurt–Stamford–Munich: McKinsey & Company, June 2023. 19 p. URL: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/is-industrial-automation-headed-for-a-tipping-point/is-industrial-automation-headed-for-a-tipping-point-vf.pdf> (дата зверення: 11.10.2025).

29. Aziz S., Jung D. W., Uz Zaman U. K., Aqeel A. B. Digital Twins in Smart Manufacturing. In: Handbook of Manufacturing Systems and Design: An Industry 4.0 Perspective. CRC Press, 2023. P. 52–68. DOI: 10.1201/9781003327523-6 (дата зверення: 27.10.2025).

30. Bosch. Nexeed: Welcome to the Smart Factory. URL: <https://www.bosch.com/stories/nexeed-smart-factory/> (дата зверення: 22.11.2025).
31. Bosch. Energy Platform at Bosch Plant in Homburg. Bosch Media Service, 17.05.2022. URL: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/energy-platform-at-bosch-plant-in-homburg-240773.html> (дата зверення: 22.11.2025).
32. Siemens AG. Digital Transformation: Leading by Example. Electronics Works Amberg. Siemens, с. 2023. URL: <https://www.siemens.com/global/en/company/stories/industry/electronics-digitalenterprise-futuretechnologies.html> (дата зверення: 22.11.2025).
33. NavVis GmbH. Siemens and the Digital Factory of the Future, Powered by NavVis. Case Study, 2022. URL: <https://www.navvis.com/resources/case-studies/siemens> (дата зверення: 22.11.2025).
34. Tesla, Inc. Manufacturing. Tesla, с. 2024. URL: <https://www.tesla.com/manufacturing> (дата зверення: 22.11.2025).
35. Kane M. Tesla's Annual Vehicle Capacity Increased to Over 2.3 Million. InsideEVs, 23.10.2023. URL: <https://insideevs.com/news/692819/tesla-production-sites-model-assignment-october2023/> (дата зверення: 22.11.2025).
36. Cao H. Industrial Internet-Driven Digital Transformation in Manufacturing: A Case Study of Foxconn's BEACON Platform. *Frontiers in Business, Economics and Management*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 128–131. DOI: 10.54097/9yzq532. URL: <https://drpress.org/ojs/index.php/fbem/article/view/27652> (дата зверення: 22.11.2025).
37. Sangfor Technologies. How Foxconn Transitioned to Smart Manufacturing with Sangfor VDI. Case Study, 2019. URL: <https://www.sangfor.com/success-stories/foxconn-technology-group-smart-manufacturing-with-sangfor-vdi> (дата зверення: 22.11.2025).
38. BMW Group. Automated Surface Processing at BMW Group Plant Regensburg – Trio of Digital Paint Shop Processes. BMW PressClub Global, 02.05.2023. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0411621EN/automated->

surface-processing-at-bmw-group-plant-regensburg-%E2%80%93trio-of-digital-paint-shop-processes (дата зверення: 22.11.2025).

39. BMW Group. Intelligently Connected Factory: BMW Group Plant Regensburg Drives Digitalisation and Automation of Logistics with Cloud-Based Traffic Control System. BMW PressClub, 29.10.2024. URL: <https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0445860EN/intelligently-connected-factory%3A-bmw-group-plant-regensburg-drives-digitalisation-and-automation-of-logistics-with-cloud-based-traffic-control-system> (дата зверення: 22.11.2025).

40. AIPRM. 100+ Must-Know Robotics Statistics 2025. URL: <https://www.aiprm.com/robotics-statistics/> (дата зверення: 04.12.2025).

41. Reuters. China overtakes Germany in industrial use of robots, says report. 20.11.2024. URL: <https://www.reuters.com/technology/china-overtakes-germany-industrial-use-robots-says-report-2024-11-20/> (дата зверення: 25.11.2025).

42. International Federation of Robotics. Global Robot Density in Factories Doubled in Seven Years. URL: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/global-robot-density-in-factories-doubled-in-seven-years> (дата зверення: 25.11.2025).

43. Automation Magazine. Global Robot Installations 4.28M Units. URL: <https://www.automationmag.com/ifr-world-robotics-report-2023/> (дата зверення: 04.12.2025).

44. Subcommittee on Advanced Manufacturing. National Strategy for Advanced Manufacturing. Washington, DC: Executive Office of the President of the United States, 2022. URL: <https://www.manufacturing.gov/sites/default/files/2022-10/FINAL%20National%20Strategy%20for%20Advanced%20Manufacturing%2010072022%20Approved%20for%20Release.pdf> (дата зверення: 25.11.2025).

45. National Institute of Standards and Technology (NIST). CHIPS for America // NIST. 2022. URL: <https://www.nist.gov/chips> (дата зверення: 25.11.2025).

46. National Science Foundation; National Center for Science and Engineering Statistics (NCSES). Digitalization, Cloud Computing, and Innovation in U.S. Business

(NSF 22-213). Alexandria, VA: NSF, 2022. URL: <https://nces.nsf.gov/pubs/nces22213> (дата зверення: 25.11.2025).

47. Mordor Intelligence. United States Cloud Computing Market – Size, Share, Trends, & Growth Forecasts (2025–2030). *Mordor Intelligence*. 2025. URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/united-states-cloud-computing-market> (дата зверення: 25.11.2025).

48. OECD. Digital-intensive services value added embodied in manufacturing exports as a share of manufacturing export value. *OECD Going Digital Toolkit*. URL: <https://goingdigital.oecd.org/en/indicator/70> (дата зверення: 25.11.2025).

49. Plattform Industrie 4.0. Background. URL: <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/EN/ThePlatform/Background/background.html> (дата зверення: 25.11.2025).

50. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Industrie 4.0. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. URL: <https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/EN/Dossier/industrie-40.html> (дата зверення: 25.11.2025).

51. Eurostat. 45% EU enterprises bought cloud services in 2023. Eurostat News, 08.12.2023. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20231208-1> (дата зверення: 25.11.2025).

52. The State Council Information Office of the People's Republic of China. SCIO press conference on development of industry and information technology in 2023. 19.01.2024. URL: https://english.scio.gov.cn/pressroom/node_9006663.htm (дата зверення: 25.11.2025).

53. China Daily. Scale of internet development spreads across industries. 2023. URL: <https://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/45/rss/channel/www/columns/852i2s/stories/WS60ee9523a310efa1bd661e20.html> (дата зверення: 25.11.2025).

54. Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). China home to nearly 3.38 mln 5G base stations by end of 2023 // The State Council of the PRC. 19.01.2024. URL:

https://english.www.gov.cn/archive/statistics/202401/19/content_WS65aa171cc6d0868f4e8e34c5.html (дата зверення: 25.11.2025).

55. Kim M., Chung S., Lee C. Smart Policies for Smart Factories. KDI Focus, No. 97. Sejong: Korea Development Institute, 2019. URL: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/226832/1/kdi-focus-97.pdf> (дата зверення: 25.11.2025).

56. International Trade Administration. South Korea – Manufacturing Technology – Smart Factory // Country Commercial Guide. 05.12.2023. URL: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/south-korea-manufacturing-technology-smart-factory> (дата зверення: 25.11.2025).

57. OECD. Getting Skills Right: Enhancing Training Opportunities in SMEs in Korea. Paris: OECD Publishing, 2020. URL: https://www.oecd.org/en/publications/enhancing-training-opportunities-in-smes-in-korea_7aa1c1db-en.html (дата зверення: 25.11.2025).

58. Invest KOREA. A smart factory uses AI and big data to integrate production processes (Industry Focus). 04.03.2021. URL: https://www.investkorea.org/ik-en/bbs/i-5025/detail.do?ntt_sn=490753 (дата зверення: 25.11.2025).

59. BCG. The Factory of the Future. Boston: Boston Consulting Group, 2016. URL: <https://www.bcg.com/publications/2016/leaning-manufacturing-operations-factory-of-future> (дата зверення: 22.10.2025).

60. World Economic Forum. Platform for Shaping the Future of Advanced Manufacturing and Value Chains. Geneva: World Economic Forum, 2020. 42 p. URL: <https://web-material3.yokogawa.com/2/31960/files/Keynote%20-%20Platform%20for%20Shaping%20the%20Future%20of%20Advanced%20Manufacturing%20and%20Value%20Chains%20v2.pdf> (дата зверення: 27.10.2025).

61. Gartner, Inc. Gartner Identifies Top Supply Chain Technology Trends for 2025. Stamford, CT: Gartner Press Release, 18 March 2025. URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2025-03-18-gartner-identifies-top-supply-chain-technology-trends-for-2025> (дата зверення: 27.10.2025).

62. International Monetary Fund (IMF). World Economic Outlook Database, April 2023: Groups and Aggregates. URL: <https://www.imf.org/en/publications/weo/weo-database/2023/april/groups-and-aggregates> (дата зверення: 03.12.2025).

63. World Bank. World Bank Country Classifications by Income Level for 2024–2025. World Bank Blogs. URL: <https://blogs.worldbank.org/en/opendata/world-bank-country-classifications-by-income-level-for-2024-2025> (дата зверення: 03.12.2025).

64. NV. Ukraine Classified as Upper Middle-Income Country for First Time by World Bank. NV Business. URL: <https://english.nv.ua/business/ukraine-classified-as-upper-middle-income-country-for-first-time-by-world-bank-50431722.html> (дата зверення: 03.12.2025).

65. World Bank. Industry (including construction), value added (% of GDP) – Turkey. URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.TOTL.ZS?locations=TR> (дата зверення: 03.12.2025).

66. World Bank. The World Bank in Viet Nam. Overview. URL: <https://www.worldbank.org/en/country/vietnam/overview> (дата зверення: 03.12.2025).

67. Financial Times. Vietnam Set to Be Upgraded to Secondary Emerging Market. URL: <https://www.ft.com/content/692704cc-a25b-455f-9ccc-9bde02da3c51> (дата зверення: 03.12.2025).

ДОДАТОК А

Таблиця А. 1 – Цифрові технології, що використовуються в індустрії
«розумних фабрик»*

Назва (англ., аббревіатура)	Український еквівалент	Короткий опис
Industrial Internet of Things (IIoT)	Промисловий Інтернет речей	Мережа підключеного промислового обладнання, датчиків і контролерів, що збирають та передають дані про стан машин, процесів і ресурсів для моніторингу та оптимізації роботи «розумних фабрик».
Cyber-Physical Systems (CPS)	Кіберфізичні системи	Інтегровані комплекси, у яких програмні моделі та цифрові сервіси безпосередньо пов'язані з фізичними об'єктами та процесами, забезпечуючи їх автоматизоване керування та координацію.
Manufacturing Execution System / Enterprise Resource Planning (MES / ERP)	Системи диспетчерського керування виробництвом (MES) та планування ресурсів підприємства (ERP)	Клас систем, що поєднує оперативне керування виробничими операціями з бізнес-рівнем планування ресурсів, фінансів, закупівель і збуту, формуючи єдиний інформаційний контур «розумної фабрики».
Digital Twin (DT)	Цифровий двійник	Віртуальна модель виробу, процесу, лінії або заводу, яка постійно синхронізується з фактичними даними й використовується для аналізу, прогнозування та випробування змін без ризику для реального виробництва.
Data Analytics and Artificial Intelligence (AI/ML)	Аналітика даних і штучний інтелект	Методи обробки великих масивів виробничих та бізнес-даних, що дозволяють виявляти закономірності, прогнозувати відмови, оптимізувати режими роботи та підтримувати ухвалення рішень на «розумних фабриках».
Robotics and Autonomous Systems (Industrial Robots, Cobots, AMR)	Роботизовані та автономні системи (промислові роботи, колаборативні роботи, автономні мобільні роботи)	Автоматизовані виконавчі пристрої для виконання технологічних операцій і внутрішньої логістики; можуть працювати автономно або спільно з людьми, забезпечуючи

		гнучкість і стабільну якість процесів.
Edge and Cloud Computing	Периферійні та хмарні обчислення	Інфраструктура обробки й зберігання даних, що поєднує локальні обчислювальні вузли на рівні цеху з віддаленими дата-центрами чи хмарними платформами для централізованої аналітики та керування.
Augmented Reality / Virtual Reality (AR/VR)	Технології доповненої та віртуальної реальності (AR/VR)	Засоби візуалізації й підтримки операторів та інженерів: відображають інструкції, параметри процесів, 3D-моделі в реальному часі, використовуються для навчання, дистанційної підтримки й підвищення безпеки праці.
Industrial Cybersecurity	Промислова кібербезпека	Технології та практики захисту промислових мереж, обладнання та даних від несанкціонованого доступу, збоїв і кіберінцидентів, що є критичними для безперервності та безпеки функціонування «розумних фабрик».

*Джерело: складено автором за [11; 8]

ДОДАТОК Б

Таблиця Б. 1 – Основні канали впливу “розумних фабрик” на конкурентоспроможність підприємств і національних економік*

Канал впливу	Рівень підприємства (мікрорівень)	Рівень національної економіки (макрорівень)	Приклади індикаторів
Продуктивність та ефективність виробництва	Підвищення продуктивності праці; скорочення простоїв; зменшення частки браку; оптимізація витрат на обслуговування та ремонти; підвищення завантаження обладнання.	Зростання промислової продуктивності праці; зростання валової доданої вартості у переробній промисловості; підвищення частки високоефективних підприємств у структурі галузі.	Випуск на одного зайнятого; собівартість одиниці продукції; фондовіддача; частка браку; індекси продуктивності праці та капіталу.
Інноваційність та розвиток продуктів	Скорочення циклу розроблення та виведення на ринок нових продуктів; розширення портфеля інноваційної продукції; використання цифрових двійників і даних експлуатації для вдосконалення конструкції.	Зростання частки високотехнологічної та наукоємної продукції в експорті; посилення позицій у глобальних індексах інноваційності; розвиток національних інноваційних кластерів.	Частка нових продуктів у виручці; витрати на НДДКР; кількість патентів; частка високотехнологічного експорту.
Інтеграція в глобальні ланцюги створення вартості	Поглиблення кооперації з міжнародними партнерами; виконання більш складних функцій (проектування, інжиніринг, сервіс) у ланцюгах вартості; відповідність міжнародним стандартам якості й прозорості.	Збільшення ролі країни в глобальних ланцюгах створення вартості; зміщення від сировинної/толінгової спеціалізації до складніших сегментів; зростання привабливості для ПП у переробну промисловість.	Частка промислового експорту з високою доданою вартістю; глибина участі в глобальних ланцюгах створення вартості; обсяг ПП у промисловість; частка контрактного виробництва високого рівня складності.
Енергетична та екологічна ефективність	Зниження енергоємності продукції; оптимізація споживання	Зменшення загальної енергоємності ВВП; скорочення промислових викидів; зміцнення позицій	Споживання енергії на одиницю продукції; викиди CO ₂ та інших забруднювачів на одиницю випуску;

	ресурсів; зменшення викидів і відходів завдяки моніторингу та оптимізації процесів у реальному часі.	країни в «зелених» ланцюгах постачання та на ринках з жорсткими екологічними вимогами.	частка «чистої» енергії в промисловому споживанні.
Розвиток людського капіталу	Формування нових цифрових і міждисциплінарних компетенцій; зростання продуктивності праці завдяки кращим інструментам підтримки прийняття рішень; підвищення безпеки праці.	Підвищення кваліфікації робочої сили в промисловості; зростання попиту на висококваліфікованих фахівців; формування національної бази кадрів для цифрової індустріалізації.	Частка працівників із цифровими компетенціями; витрати на навчання персоналу; продуктивність праці; рівень травматизму на виробництві.
Інституційна спроможність та промислові екосистеми	Впровадження стандартів, регламентів і процедур управління даними, якістю, кібербезпекою; розвиток внутрішніх центрів компетенцій та кросфункціональних команд.	Узгодженість промислової, інноваційної, цифрової та освітньої політик; розвиток кластерів «розумних фабрик»; наявність програм підтримки цифрової трансформації промисловості.	Наявність національних/галузових стратегій Індустрії 4.0; кількість промислових кластерів і технопарків; обсяг державної та донорської підтримки цифровізації промисловості.

*Джерело: складено автором за [7; 4; 8]

ДОДАТОК В

Таблиця В. 1 – Основні параметри кейсів впровадження «розумних фабрик» у провідних компаніях*

Компанія	Країна / базові виробничі майданчики	Тип виробництва та профіль «розумних фабрик»	Ключові цифрові технології та рішення	Основні результати за (KPI)	Стратегічні конкурентні переваги
Bosch	Німеччина, глобальна мережа заводів (зокрема Гомбург, Ройтлінген)	Машинобудування, електроніка; мережа «розумних фабрик», що одночасно є полігоном і вітриною для рішень Індустрії 4.0	Платформа керування виробництвом і логістикою Nexeed; промисловий Інтернет речей; аналітика даних та енергоменеджмент; застосування штучного інтелекту для планування й диспетчеризації виробництва	Підвищення продуктивності окремих майданчиків приблизно на 25 %; скорочення витрат на технічне обслуговування на 30 %; зменшення енергоспоживання (напр., до 40 % економії електроенергії на системах стисненого повітря); прискорення проходження продукції на напівпровідниковому виробництві	Посилення високої ефективності, якості та енергоощадності; можливість комерціалізації власних цифрових рішень для зовнішніх клієнтів; зміцнення позицій у сегменті Індустрії 4.0
Siemens	Німеччина (Electronics Works Amberg)	Виробництво електронних компонентів і систем автоматизації; високорівнева автоматизована «розумна фабрика» з цифровим двійником	Промисловий Інтернет речей; цифровий двійник підприємства; інтегровані системи MES, ERP та CAD/PLM; штучний інтелект у контролі якості; принципи ощадливого виробництва	Багаторазове зростання продуктивності порівняно з початковим періодом; стабільний рівень зайнятості при значному прирості випуску; дуже низька частка дефектів; скорочення часу переналагодження й запасів	Демонстраційний майданчик цифрового підприємства; прискорений вивід на ринок нових продуктів; підвищення привабливості портфеля рішень Siemens для глобальних клієнтів

				незавершеного виробництва	
Tesla	США, Німеччина, Китай (мережа "гігафабрик")	Виробництво електромобілів, акумуляторів та силової електроніки; висока вертикальна інтеграція та масштабовані "гігафабрики"	Розширена роботизація; комп'ютерний зір для контролю якості; інтегровані цифрові платформи планування виробництва й логістики; модульна організація ліній на основі підходу "розпакованого" (unboxed) виробництва; широке використання даних у реальному часі	Сукупна потужність мережі – понад 1 млн автомобілів на рік; скорочення тривалості виробничих циклів; швидкий запуск нових моделей; підвищення стабільності якості на високих обсягах випуску	Поєднання масштабної ефективності з гнучкістю оновлення продукту; посилення позицій на глобальному ринку електромобілів і акумуляторних технологій; програмно-орієнтована модель виробництва
Foxconn	Тайвань, Китай та інші країни (глобальна мережа контрактних майданчиків)	Контрактне виробництво електроніки для глобальних брендів; «розумні фабрики», інтегровані в єдину промислову інтернет-платформу	Промислова інтернет-платформа BEACON; збір і аналіз великих масивів виробничих даних; стандарти TSN для інтеграції IT та OT; впровадження віртуальної десктопної інфраструктури (VDI); застосування штучного інтелекту й робототехніки	Підвищення продуктивності й завантаження обладнання; скорочення простоїв; покращення керованості якості та енергоспоживання; уніфікація практик підвищення ефективності в різних регіонах	Здатність масштабувати контрактне виробництво для багатьох замовників із високими вимогами до якості й термінів; утримання позицій глобального виробничого хаба; підвищення прозорості й керованості ланцюгів постачання
BMW	Німеччина (завод у Регенсбурзі та інші)	Преміальне автомобілебудування; «розумні фабрики», орієнтовані на поєднання продуктивності,	Цифровізовані й автоматизовані процес лакофарбового покриття; хмарна система	Підвищення однорідності та швидкості контролю якості; скорочення простоїв і оптимізація	Зміцнення позицій у преміальному сегменті за рахунок поєднання кастомізації,

	майдан чики в рамках концеп ції BMW iFACT ORY)	якості, гнучкості та екологічної сталості	управління внутрішньою логістикою; застосування комп'ютерного зору та генеративного штучного інтелекту для візуального контролю якості; інтегроване цифрове планування виробництва	використання складських площ; покращення показників енергоефективно сті й екологічної результативності	якості й сталого виробництва; формування еталонної моделі заводу майбутнього в межах концепції BMW iFACTORY
--	---	---	---	--	---

*Джерело: складено автором за [30-39]