

Олександр Сергійович Сердюк

д-р екон. наук, старший дослідник,

ORCID 0000-0003-3049-3144

e-mail: serdyuk_O@nas.gov.ua;

Ірина Павлівна Петрова,

канд. екон. наук, старший дослідник,

e-mail: petrova_I@nas.gov.ua

ORCID 0000-0002-0515-5349

Інститут економіки промисловості

НАН України

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУСТРІЇ 4.0 НА ІНСТИТУЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ ЧИННИКИ ГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Вступ. Технології Індустрії 4.0 формують якісно нові умови функціонування економічних систем, трансформуючи не лише технологічні параметри виробництва, а й інституційно-економічні засади господарської діяльності. Їх упровадження супроводжується змінами механізмів координації економічних агентів, структури витрат, логіки формування доданої вартості та характеру взаємодії між суб'єктами ринку. Унаслідок цього зростає потреба в поглибленому аналізі системних ефектів цифрових технологій, які виходять за межі окремих виробничих процесів і впливають на архітектоніку економічного середовища загалом.

Попри багатомірність впливу технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники, у межах даного дослідження для подальшої аналітичної оцінки виокремлено три ключові параметри: транзакційні витрати, ланцюги створення вартості та моделі міжагентної взаємодії. Їх пріоритетність зумовлена тим, що саме вони найбільш повно репрезентують системні зрушення у господарському середовищі та акумулюють вплив інших факторів. Зокрема, зниження транзакційних витрат відображає ефективність нових механізмів координації та рівень інституційної довіри; трансформація ланцюгів створення вартості ілюструє перехід від ієрархічних до мережових форм організації виробництва; а еволюція моделей міжагентної взаємодії свідчить про переформатування економічних відносин у цифровому середовищі. Таким чином, ана-



© Видавець Інститут економіки промисловості НАН України, 2025

© Видавець Академія економічних наук України, 2025

ліз зазначених параметрів дозволяє комплексно оцінити інституційний та економічний ефект упровадження технологій Індустрії 4.0.

Вплив технологій Індустрії 4.0 на економічну систему реалізується через зміну окремих чинників, які в окремих випадках зумовлюють структурні перетворення та модифікують конфігурацію її базових елементів. Водночас спектр системного впливу є значно ширшим, оскільки не всі системні ефекти обов'язково призводять до структурних трансформацій. Так, на ланцюги створення вартості поряд із технологією 3D-друку істотно впливають також великі дані, робототехніка, хмарні обчислення та Інтернет речей; однак у низці випадків такі зміни обмежуються оптимізацією процесів без трансформації самої архітектури економічної системи. Натомість зміни моделей міжагентної взаємодії доцільно розглядати як ключовий елемент структурного розвитку економіки, оскільки вони відображають глибинні інституційні зрушення, логіка яких виходить за межі суто виробничих трансформацій і має фундаментальне значення з позиції довгострокових економічних наслідків.

У сучасному науково-аналітичному дискурсі вплив технологій Індустрії 4.0 зазвичай розглядається у двох взаємопов'язаних площинах: як чинник підвищення ефективності та продуктивності господарських процесів і як джерело інституційних зрушень, що змінюють правила взаємодії економічних агентів. При цьому ключові ефекти цифрових технологій найчастіше проявляються через зниження трансакційних витрат, перебудову ланцюгів створення вартості та еволюцію моделей міжагентної взаємодії. Водночас у прикладних оцінках ці напрями нерідко подаються роз'єднано, що ускладнює цілісне бачення механізмів впливу окремих технологій та порівняння їх результативності. З огляду на це, для впорядкування подальшого аналізу розроблено матрицю, яка виступає аналітичною схемою (орієнтиром) оцінки впливу технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності (рис. 1). Вона відображає напрями та потенційну глибину впливів окремих технологій на трансакційні витрати, ланцюги створення вартості та моделі міжагентної взаємодії, визначаючи логіку подальшого дослідження. Безпосередню оцінку здійснено на основі аналізу реальних кейсів, які конкретизують прояви цих ефектів у практичному вимірі.

Великі дані є однією з ключових технологій Індустрії 4.0, сфера застосування якої виходить за межі виробничих процесів і охоплює ланцюги створення вартості. Використання великих даних







| Технологія | Трансакційні витрати (ТВ) | Ланцюги створення вартості (ЛСВ) | Моделі міжагентної взаємодії (МAB) |
|--|---|--|--|
|  <p>Великі дані</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ скорочення за рахунок аналітики та прогнозування</p> | <p>✓ спрощення координації між агентами через доступ до інформації</p> |
|  <p>3D-Друк</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ локалізація та скорочення ланцюгів створення вартості</p> | ∅ (несистемний вплив) |
|  <p>Блокчейн</p> | <p>✓ зниження витрат на перевірку угод і контрактів</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ формування довіри та прозорості без посередників</p> |
|  <p>Робототехніка</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ підвищення ефективності виробничих етапів</p> | ∅ (несистемний вплив) |
|  <p>Хмарні обчислення</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ нові моделі обробки та зберігання даних</p> | ∅ (несистемний вплив) |
|  <p>Інтернет речей</p> | ∅ (несистемний вплив) | <p>✓ оптимізація логістики й управління запасами</p> | <p>✓ створення «живих» мереж взаємодії між об'єктами та агентами</p> |

Рис. 1. Матриця напрямів впливу технологій Індустрії 4.0 на трансакційні витрати, ланцюги створення вартості та моделі міжагентної взаємодії

забезпечує можливість комплексного аналізу та прогнозування попиту, пропозиції й поведінки споживачів у режимі реального часу. Це дає змогу підприємствам своєчасно коригувати обсяги виробництва, оптимізувати логістичні маршрути та скорочувати запаси на проміжних етапах, знижуючи витрати на зберігання й транспортування. Крім того, завдяки аналітичним інструментам зменшується інформаційна асиметрія між учасниками ланцюгів створення вартості: постачальники отримують точніший прогноз попиту, а виробники — оперативний зворотний зв'язок щодо якості та швидкості поставок, тоді як дистриб'ютори — більш гнучкі можливості планування. Це сприяє скороченню надлишкових посередницьких ланок, підвищує прозорість угод і створює передумови для переходу від ієрархічних до мережових моделей організації постачань.

Метою дослідження є оцінка впливу ключових технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності шляхом аналізу змін транзакційних витрат, ланцюгів створення вартості та моделей міжагентної взаємодії на основі узагальнення реальних бізнес-кейсів і кількісних результатів їх упровадження.

Виклад основного матеріалу. Реалізація окреслених механізмів впливу підтверджується низкою бізнес-кейсів, що демонструють кількісні результати застосування великих даних у глобальних компаніях. Так, логістичний гігант UPS використовує систему ORION, що аналізує телеметрію вантажівок і будує оптимальні маршрути доставки. Завдяки цьому компанія щорічно заощадує близько 10 млн галонів пального і знижує витрати на 300–400 млн дол. США, скорочуючи також викиди CO₂ на 100 тис. тонн [1]. Це приклад того, як великі дані змінюють логістику та скорочують витрати у ланцюгах постачання.

У сфері роздрібної торгівлі найбільший ритейлер світу Walmart впровадив технологію великих даних для оптимізації ланцюга постачання та роботи з клієнтами. Компанія в реальному часі аналізує транзакції в магазинах і онлайн-платформах, дані про запаси, погодні умови та навіть активність у соцмережах, щоб точніше прогнозувати попит і персоналізувати маркетинг. За рахунок цього нестача товарів на полицях зменшилась на 16%, витрати на логістику скоротилися приблизно на 10%, а виручка зросла на 2,5% [2]. В електронній комерції Walmart після впровадження Big Data зафіксував стрибок онлайн-продажів на 10–15%, що дало близько \$1 млрд додаткового доходу за короткий період [3]. Ці результати яскраво демонструють, як великі дані зміцнили весь ланцюг створення вартості Walmart – від складу до споживача.

Яскравим прикладом того, як завдяки великим даним підвищується ефективність післяпродажного обслуговування важкої техніки – критичного етапу ланцюга створення вартості в машинобудуванні, є компанія Caterpillar. Промисловий лідер у галузі виробництва важкої техніки обладнає свої машини датчиками і збирає телеметричні дані про стан двигунів, вузлів і режим роботи. За допомогою алгоритмів машинного навчання Caterpillar прогнозує несправності ще до їх виникнення, що дає змогу вчасно проводити ремонт і уникати простоїв у клієнтів. Так, наприклад, одна з моделей аналізу даних виявляє розбавлення мастила в двигуні – критичну проблему, що раніше лишалась непоміченою близько 10 днів. Завдяки великим даним цей час виявлення скоротили до 2,4 години, що дозволило клієнту уникнути серйозної поломки і зекономити приблизно 360 тис. дол. США на ремонті. Інший випадок: аналіз даних попередив надмірне пробуксовування коліс великого навантажувача через поганий стан дороги – дилер отримав сигнал і оперативно допоміг виправити ситуацію, заощадивши клієнту ~ 500 тис. дол. США на непродуктивних простоях техніки [4]. Таким чином, великі дані вбудовані в сервісний ланцюг Caterpillar підвищують готовність обладнання, зменшують витрати клієнтів і додають конкурентну цінність продукції (модель «продаж не лише техніки, а й продуктивного часу без простоїв»).

Не менш показовим є приклад стрімінгового сервісу Netflix, який завдяки великим даним перебудував свій ланцюг створення цінності в частині взаємодії з клієнтом – шляхом персоналізації контенту. Netflix збирає дані про перегляди, рейтинги і пошуки кожного користувача та застосовує алгоритми рекомендацій, щоб індивідуально підібрати фільми/серіали для кожного глядача. Ця система рекомендацій стала критичною ланкою сервісного ланцюга, оскільки прямо впливає на задоволеність і утримання підписників. За оцінками самої компанії, персоналізація контенту економить Netflix понад 1 млрд дол. США на рік [5]. Іншими словами, якби платформа не рекомендувала користувачам відповідні уподобанням фільми, багато хто міг би швидше втратити інтерес і скасувати підписку – що коштувало б компанії мільярдні втрати щороку. Великі дані у цьому випадку дозволили Netflix суттєво знизити відтік клієнтів і максимізувати цінність кожного етапу – від вибору контенту до його споживання – тим самим підвищуючи загальну довгострокову вартість бізнесу.

Таким чином, наведені кейси чітко демонструють, що впровадження технологій великих даних зумовлює суттєвий еконо-

мічний ефект. Оптимізація маршрутів логістики, розумне управління запасами, прогнозне обслуговування обладнання чи персоналізація для клієнтів – усе це призводить до конкретних фінансових та операційних вигод. Великі дані допомагають компаніям зменшувати витрати, підвищувати ефективність і доходи, а отже – створювати більшу цінність на кожному етапі їхнього бізнес-ланцюга. Це підтверджують реальні цифри: від сотень тисяч доларів економії на окремих операціях до мільярдних приростів доходів, що робить великі дані одним із ключових чинників посилення конкурентоспроможності сучасних компаній.

Разом із цим, великі дані змінюють модель агентської взаємодії, сприяючи переходу від ієрархічної до мережевої структури координації. Якщо в традиційній системі обмін інформацією та прийняття рішень відбувалися централізовано — через управлінські рівні або спеціалізовані посередницькі ланки, — то аналітика великих даних забезпечує можливість прямої, децентралізованої взаємодії між учасниками. Кожен агент отримує доступ до актуальних даних у реальному часі, що дозволяє самостійно ухвалювати рішення, синхронізуючи свої дії з іншими учасниками мережі без необхідності централізованого контролю. Така динамічна модель координації не лише підвищує гнучкість системи, а й зменшує трансакційні витрати, пов'язані з узгодженням і контролем. У результаті формується новий тип міжагентного середовища — відкритий, саморегульований і побудований на взаємній довірі та прозорості інформаційних потоків.

Показовим прикладом є досвід Walmart, який використав технології великих даних для автоматизації переговорних процесів із постачальниками. Зокрема, компанія впровадила AI-систему *Racum*, що веде переговори з партнерами про умови контрактів, базуючись на аналізі історичних транзакцій і ринкових трендів. Унаслідок цього рівень досягнення взаємовигідних угод зріс до 68%, а витрати на закупівлі зменшилися приблизно на 1,5% від загального обсягу [6]. Окрім прямої економії, компанія скоротила витрати часу на узгодження та підвищила оперативність контролю поставок.

Подібних результатів досягла компанія *Procter & Gamble (P&G)* — один із світових лідерів у сфері виробництва споживчих товарів повсякденного попиту (FMCG). В Індії компанія запровадила аналітику великих даних у систему управління дистрибуцією, інтегрувавши цифрові потоки інформації між виробничими підрозділами, посередниками та торговими агентами. Такий підхід забезпечив обмін даними в режимі реального часу, що дало змогу

зменшити кількість «точок дотику» — етапів, на яких раніше здійснювалось ручне узгодження чи контроль — на 60% [7]. У результаті це не лише знизило адміністративні витрати, а й скоротило тривалість операцій, підвищивши ефективність координації між усіма учасниками збутової мережі.

В авіаційній галузі компанія Airbus застосувала великі дані не лише для оптимізації виробничих процесів, а й для підвищення прозорості взаємодії з численними зовнішніми партнерами та постачальниками, що є ключовим джерелом трансакційних витрат у високотехнологічних секторах. У межах проєкту APROCONE компанія створила цифрову платформу спільного доступу до технічних даних, креслень і специфікацій, що дало змогу зменшити кількість етапів погодження між незалежними контрагентами. Унаслідок цього час на узгодження технічних змін скоротився з кількох тижнів до кількох годин, що дозволило знизити витрати на комунікацію, контроль і повторні перевірки документації [8]. Таким чином, великі дані уможливили нову модель співпраці між агентами — засновану на довірі до спільних даних, а не на багаторівневному адміністративному контролі.

Ще один приклад ефективного використання великих даних у зниженні координаційних витрат демонструє порт Роттердам, де компанії Maersk та APM Terminals впровадили платформу PortXchange. Система об'єднала всі суб'єкти портової взаємодії — операторів терміналів, буксири, лоцманів і перевізників — у єдине інформаційне середовище, що забезпечує обмін даними в реальному часі. Завдяки цьому середній час очікування судна після завершення вантажних операцій скоротився з 47 до 32 хвилин, тобто приблизно на 33%, що призвело до зниження витрат на простой та підвищення узгодженості операцій у морській логістиці [9].

Наведені кейси переконливо свідчать, що впровадження технологій великих даних формує нову якість міжорганізаційної взаємодії, засновану на даних, прозорості та довірі. Компанії переходять від ієрархічних або адміністративно координованих форм співпраці до мережевих моделей, у яких аналітика та алгоритми реального часу стають основними механізмами узгодження рішень. Це не обов'язково супроводжується безпосереднім скороченням трансакційних витрат, проте змінює саму архітектуру міжагентних зв'язків — від процедурного контролю до цифрової довіри, від послідовних транзакцій до інтегрованих платформ взаємодії. У результаті великі дані виступають не стільки чинником зниження витрат, скільки каталізатором інституційної еволюції господарських

моделей, що забезпечує підвищення адаптивності, узгодженості та стійкості економічних систем у цифрову епоху.

При цьому, аби уникнути методологічної плутанини, слід зауважити, що в межах матриці моделі міжагентної взаємодії виділено в окрему категорію, хоча їхня ефективність також може проявлятися через рівень трансакційних витрат. Це зумовлено тим, що у даному випадку трансакційні витрати виступають наслідком глибокої структурної трансформації відносин між агентами, тоді як у категорії «трансакційні витрати» репрезентовано ефекти безпосереднього впливу технологій на вартісні параметри координації.

Наступна наведена в матриці технологія — 3D-друк — не справляє системного впливу на моделі міжагентної взаємодії та загальні трансакційні витрати. Натомість саме вона найбільш суттєво впливає на ланцюги створення вартості, оскільки змінює принципи організації виробництва й розподілу продукції. Ключовим наслідком упровадження 3D-друку є перехід до моделі кастомізованого виробництва, за якої споживач стає безпосереднім учасником процесу створення вартості. Такий підхід дає змогу виготовляти продукцію під індивідуальні запити без значних витрат на переналаштування ліній чи транспортування. У результаті скорочується кількість проміжних ланок у ланцюзі постачання, зменшуються витрати на складування, логістику та контроль якості, а сам виробничий процес стає гнучкішим і ближчим до кінцевого споживача.

Так, компанія General Electric (GE Aviation) застосувала адитивне виробництво для виготовлення паливних форсунок реактивних двигунів LEAP. Раніше кожна форсунка складалася з 20 окремих компонентів, які постачалися різними підрядниками. Завдяки 3D-друку її вдалося виробляти як єдину деталь, що дозволило практично усунути складальний етап, зменшити вагу на 25% і підвищити міцність у п'ять разів. Виробництво форсунок безпосередньо на заводі GE істотно скоротило ланцюг постачання і зменшило залежність від зовнішніх контрагентів, забезпечуючи швидше реагування на інженерні зміни та зниження виробничого циклу [10].

Схожих результатів досягнув і автомобільний завод Volkswagen Autoeuropa у Португалії, який впровадив 3D-друк для самостійного виготовлення монтажних пристроїв та інструментів. Якщо раніше ці елементи замовлялись у сторонніх підрядників із термінами постачання до двох місяців, то після переходу на внутрішнє виробництво друком час виготовлення скоротився до 1–2 днів, а вартість — на 91%. Завдяки цьому було усунуто потребу у проміжних постачальниках, що спростило виробничий ланцюг та

зеконотило підприємству понад 250 тис. євро уже протягом першого року [11].

Ще одним прикладом радикального скорочення ланцюгів створення вартості є досвід компанії Adidas, яка у межах проекту SpeedFactory застосувала 3D-друк для локального виробництва взуття безпосередньо на ключових ринках збуту. Це дозволило скоротити традиційний цикл постачання з кількох місяців до кількох тижнів, уникнувши тривалого транспортування з Азії. 3D-друк проміжної підшви з матеріалу Boost дав змогу виробляти обмежені партії взуття без дорогих прес-форм, а виробництво «just-in-time» забезпечило зменшення складських запасів і транспортних витрат [12].

Подібну стратегію реалізувала Deutsche Bahn (DB) — одна з найбільших транспортно-логістичних компаній Європи, що відповідає за експлуатацію залізничної інфраструктури та пасажирських перевезень у Німеччині. Компанія використала технологію 3D-друку для виготовлення запасних частин «на вимогу», що стало критично важливим у контексті обслуговування великого парку рухомого складу, де часто потрібні рідкісні або зняті з виробництва компоненти. Раніше виготовлення таких деталей займало до шести тижнів і вимагало утримання великих складських запасів. Після впровадження адитивних технологій DB зменшила час виробництва окремих деталей до 13 годин і знизила собівартість деяких комплектуючих на 80%, фактично створивши цифровий склад із понад 100 тис. позицій, який дозволяє друкувати необхідні елементи безпосередньо на об'єктах технічного обслуговування [13, 14].

Таким чином, наведені приклади демонструють, що 3D-друк змінює просторову та функціональну конфігурацію ланцюгів створення вартості — переводячи виробництво ближче до кінцевого споживача, скорочуючи логістику та усуваючи надлишкові проміжні етапи. Це не лише зменшує витрати часу та ресурсів, а й створює передумови для переходу до децентралізованої моделі виробництва, у якій головним джерелом ефективності стає гнучкість і швидкість реагування на попит.

Наступна у списку технологія Індустрії 4.0 — блокчейн — не справляє системного впливу на ланцюги створення вартості, обмежуючись переважно локальними ефектами, пов'язаними з підвищенням прозорості економічних операцій та рівня довіри між учасниками ринку. Водночас саме ці фактори істотно змінюють структуру формування трансакційних витрат, оскільки блокчейн безпосередньо впливає на механізми узгодження, контролю та верифікації інформації. Його ключова властивість — розподілений характер

зберігання даних — усуває потребу у централізованих посередниках (банках, реєстраторах, аудиторях) для підтвердження достовірності відомостей. Це не просто скорочує витрати на перевірку чи моніторинг, а переносить саму функцію довіри з інституційного рівня на технологічний, створюючи новий тип координації між економічними агентами — на основі спільно верифікованих даних. Таким чином, блокчейн чинить системний вплив на трансакційні витрати не лише шляхом прямої оптимізації процедур, а через трансформацію логіки взаємодії, у межах якої достовірність інформації забезпечується не адміністративним контролем, а самою архітектурою технології. Саме тому його ефект найчіткіше проявляється у сферах, де висока складність і фрагментованість комунікацій традиційно формували значну частку трансакційних витрат. У цьому контексті показовими є реальні кейси провідних компаній, що вже інтегрували блокчейн у свої бізнес-процеси, досягнувши відчутного скорочення витрат на узгодження, перевірку та контроль даних.

Так, компанія Walmart спільно з IBM запровадила блокчейн-систему для відстеження походження харчових продуктів. До її впровадження перевірка джерела постачання товару займала близько тижня, тоді як після переходу на розподілений реєстр цей процес скоротився до 2,2 секунд. Таким чином, компанія ліквідувала потребу в тривалому зборі й узгодженні інформації між численними постачальниками, зменшила витрати на контроль безпечності продукції та прискорила реагування на випадки потенційного забруднення чи фальсифікації товарів. Отже, блокчейн забезпечив не лише прозорість ланцюга постачання, а й істотне зниження трансакційних витрат, пов'язаних із верифікацією даних [15].

Ще один приклад — спільний проєкт Maersk та IBM у сфері морських контейнерних перевезень. Під час 12-місячного тестування було доведено, що цифровізація документів на основі блокчейну дозволила скоротити транзитний час постачання на 40%, уникнувши значних накладних витрат, які раніше виникали через затримки, перевірки та дублювання інформації. Усі учасники — від портових операторів до митних органів — отримали спільний доступ до достовірних даних у реальному часі, що мінімізувало витрати на контроль, звірку та адміністративне узгодження [16].

Варто також відзначити, що вплив блокчейну виходить за межі оптимізації трансакційних витрат і проявляється передусім у зміні моделі міжагентної взаємодії. Якщо на рівні витрат технологія усуває потребу в посередниках для перевірки достовірності даних, то на інституційному рівні вона формує нову логіку координації — децентралізовану, самокеровану й засновану на алгоритмічній

довірі. У межах такої моделі сторони не просто обмінюються інформацією, а взаємодіють у спільному цифровому середовищі, де правила узгодження, моніторингу та контролю вбудовані в технологічний код. Це забезпечує не лише прозорість, а й формування довіри без посередників, що стає ключовим інституційним наслідком поширення блокчейну. У практичній площині це відображається у впровадженні смарт-контрактів та розподілених платформ взаємодії, які автоматизують виконання домовленостей і знижують ризики опортуністичної поведінки. Приклади їх застосування в провідних компаніях наочно демонструють, як блокчейн поступово змінює не лише структуру витрат, а й саму природу міжорганізаційної кооперації.

Показовими прикладами трансформації моделей міжагентної взаємодії під впливом блокчейну є рішення, реалізовані провідними міжнародними компаніями у різних галузях. Так, корпорація Microsoft спільно з EY запровадила блокчейн-платформу для управління роялті у відеоігровому сегменті. Раніше взаємодія між Microsoft та сотнями партнерів — розробників і видавців — супроводжувалась тривалими звірками даних і затримками у виплатах. Внаслідок переходу на блокчейн-архітектуру зі смарт-контрактами всі транзакції почали фіксуватись у спільному розподіленому реєстрі, а виплати автоматично нараховувались за підтвердженими даними про продажі. Це усунуло потребу у посередниках і аудиторів, забезпечило повну прозорість і довіру між агентами. У результаті партнери отримують інформацію про роялті щодня (замість 45 днів раніше), а час обробки платежів скоротився майже на 99%, що радикально змінило логіку координації у партнерській екосистемі Microsoft [17].

Подібні зміни відбуваються і у фінансовому секторі. Міжнародний банк HSBC спільно з ING та агрохолдингом Cargill здійснив першу у світі операцію з використанням блокчейну для документарного акредитиву. У традиційній схемі узгодження документів між експортерами, імпортерами та банками тривало до десяти днів і потребувало численних перевірок та пересилання паперових копій. Використання платформи R3 Corda дозволило всім сторонам взаємодіяти у спільному цифровому середовищі, де дані автоматично верифікуються й синхронізуються. Завдяки цьому час оформлення акредитиву скоротився до 24 годин, а процес став повністю прозорим для кожного учасника. Внаслідок цього змінилася сама модель взаємодії між банками та клієнтами — від централізованої системи контролю до горизонтальної мережі з технологічною довірою [18].

Не менш показовим є приклад у сфері енергетики. Консорціум провідних нафтових компаній — Shell, BP та Equinor — ство-

рив блокчейн-платформу Vakt для цифровізації післятрейдингових процесів у торгівлі нафтою. Раніше кожен учасник — трейдери, виробники, банки, логістичні оператори — мав власну базу даних, що призводило до дублювання інформації, помилок і затримок у звірці документів. У новій моделі всі сторони взаємодіють у межах єдиного децентралізованого простору, де кожен етап угоди автоматично підтверджується через смарт-контракти. Це усунуло розбіжності між обліковими системами учасників, знизило адміністративні витрати й скоротило операційні витрати майже на 40% [19].

Таким чином, наведені приклади свідчать, що блокчейн формує нову архітектуру довіри, де узгодження та контроль відбуваються не через інституційні посередницькі механізми, а завдяки децентралізованим технологічним протоколам. Це створює принципово іншу модель міжагентної координації — прозору, взаємну та самоверифіковану.

У контексті наступної технології Індустрії 4.0 — робототехніки — варто зазначити, що її вплив на транзакційні витрати та моделі міжагентної взаємодії має радше локальний, а не системний характер. Натомість саме в межах ланцюгів створення вартості робототехніка справляє системний ефект, оскільки забезпечує суттєве підвищення ефективності виробничих процесів, скорочення тривалості операцій та зменшення частки ручної праці на ключових етапах виробництва. Ключовим результатом упровадження робототехнічних систем є оптимізація виробничих процесів через автоматизацію операцій, що раніше виконувались вручну. Роботи забезпечують сталість якості, точність виконання та безперервність виробництва, що дозволяє скоротити виробничі цикли й мінімізувати кількість проміжних перевірок. У результаті ланцюги створення вартості стають більш інтегрованими, а межі між окремими етапами виробництва — менш чіткими, що підвищує загальну ефективність та адаптивність промислових систем до змін попиту.

Показовим у цьому випадку є досвід компанії Electrolux — одного з провідних світових виробників побутової техніки, — яка спільно з ABB Robotics реалізувала проєкт з роботизації етапів контролю якості на виробничій лінії холодильників у Бразилії. До впровадження колаборативних роботів операції з перевірки герметичності холодильних систем і електротестування виконувались вручну, що потребувало значних витрат часу й підвищувало ризик похибок. Запровадження роботів ABB YuMi та GoFa дало змогу повністю автоматизувати ці операції: роботи здійснюють перевірку герметичності, виявлення витоків газу та фінальний електроконтроль у безперервному режимі. У результаті продуктивність тесту-

вання зросла на 68 %, водночас знизився рівень дефектності та усунуто вузьке місце у виробничому циклі, яке раніше обмежувало швидкість випуску готової продукції. Впровадження роботів також дозволило оптимізувати просторову організацію виробничої лінії та підвищити безпеку праці, оскільки оператори тепер виконують лише функції моніторингу. Таким чином, роботизація у випадку Electrolux не лише підвищила ефективність окремих етапів, а й забезпечила інтеграцію операцій контролю якості у єдиний безперервний ланцюг створення вартості, що свідчить про її системний вплив на структуру виробничого процесу [20].

Системний вплив на ланцюги створення вартості чинить також технологія хмарних обчислень, яка забезпечує нові моделі обробки, зберігання та спільного використання даних, створюючи основу для інтеграції інформаційних потоків між усіма етапами виробництва. Завдяки хмарним рішенням підприємства отримують можливість централізовано керувати розподіленими виробничими процесами, забезпечувати безперервний доступ до даних у режимі реального часу та синхронізувати дії різних підрозділів і партнерів у межах єдиного цифрового середовища. Це дає змогу скоротити витрати часу на координацію, підвищити гнучкість планування, швидше реагувати на зміни попиту й мінімізувати простой, пов'язані з інформаційними затримками.

Практичні результати інтеграції хмарних технологій у виробничі процеси переконливо демонструють їхній системний вплив на ефективність ланцюгів створення вартості. Так, компанія Jabil — один із найбільших у світі виробників електроніки — впровадила хмарну платформу для управління постачанням і виробництвом, яка об'єднала дані з сотень фабрик і постачальників у єдине цифрове середовище. Це дозволило централізовано координувати графіки виробництва, моніторити стан обладнання в реальному часі та підвищити прозорість взаємодії з партнерами. У результаті Jabil знизила виробничі витрати на 15% і підвищила своєчасність виконання замовлень на 25%, що свідчить про глибоку інтеграцію інформаційних потоків між різними етапами створення вартості [21].

Схожих результатів планує досягти Volkswagen Group, яка у партнерстві з AWS створила Industrial Cloud — промислову хмару, що об'єднує дані з усіх виробничих ліній понад 120 заводів компанії у світі. Ця платформа забезпечує синхронізацію між етапами виробництва, логістики та контролю якості, формуючи єдину цифрову екосистему. Очікується, що реалізація проекту дозволить збільшити продуктивність на 30% і зменшити витрати на 1 млрд євро у межах ланцюга постачання, що підкреслює системний ефект хмарних

технологій на операційну ефективність і взаємозв'язок елементів виробничої мережі [22].

Високу результативність у цій царині демонструє Caterpillar, яка інтегрувала хмарну систему збору та аналізу телеметричних даних від своєї будівельної техніки, що експлуатується по всьому світу. Завдяки цій системі компанія перейшла до моделі предиктивного обслуговування, коли інформаційні потоки між клієнтами, сервісними підрозділами та виробником з'єднані в єдину хмарну мережу. Це дозволило скоротити непланові простой техніки на 25% та підвищити надійність експлуатації машин [21].

У фармацевтичному секторі Takeda впровадила хмарний R&D Data Hub на базі AWS, який інтегрував понад 96% корпоративних даних у єдину платформу. Це дозволило об'єднати інформаційні потоки між науковими дослідженнями, виробництвом і клінічними випробуваннями, спростити обмін даними між підрозділами та створити умови для швидкого використання аналітики та штучного інтелекту. Результатом стало підвищення продуктивності роботи з даними на 40% та суттєве скорочення часу розробки лікарських препаратів [23].

Таким чином, наведені кейси демонструють, що хмарні обчислення поруч із оптимізацією окремих операцій, формують нову архітектуру створення вартості, де дані виступають центральним координаційним ресурсом, забезпечуючи прозорість, безперервність і синхронізацію процесів у межах глобальних виробничих мереж.

І нарешті, остання у нашому списку технологія Індустрії 4.0 — Інтернет речей — справляє системний вплив на ланцюги створення вартості, забезпечуючи інтеграцію фізичних і цифрових потоків. Завдяки цьому IoT оптимізує логістику, управління запасами та моніторинг виробничих процесів у режимі реального часу. Підключені сенсори, транспортні модулі й аналітичні платформи дозволяють підприємствам відстежувати рух матеріалів, рівень запасів і технічний стан обладнання безпосередньо під час виробництва чи транспортування. Це зменшує кількість проміжних перевірок і посередницьких етапів, забезпечуючи точність даних і синхронізацію дій між постачальниками, виробничими підрозділами та дистриб'юторами. У результаті скорочується довжина ланцюга створення вартості — за рахунок усунення надлишкових операцій і прискорення потоків матеріальних та інформаційних ресурсів, що підвищує ефективність функціонування всієї системи. Показовий приклад такого скорочення продемонструвала компанія Walmart, яка інтегрувала IoT-рішення на основі RFID-міток для відстеження запасів у магазинах і центрах дистрибуції. Завдяки цьому точність

інвентаризації зросла з приблизно 63% до понад 95%, а випадки відсутності товарів на полицях скоротилися на 40%. Система дозволила відмовитися від трудомістких ручних перевірок, зменшити втрати продажів і підвищити ефективність управління логістичними потоками [24].

Схожих результатів досягла компанія Amazon, яка у своїх центрах виконання замовлень застосовує IoT-системи моніторингу та роботизовані візки, що координуються через хмарну платформу. Унаслідок цього час від надходження замовлення до його відправлення скоротився на 80%, вантажомісткість складів зросла на 50%, а операційні витрати зменшилися приблизно на 20% [25]. Така інтеграція фізичних і цифрових процесів перетворила складську логістику на високоавтоматизовану систему з адаптивним управлінням потоками.

Ще один показовий кейс — Maersk, який оснастив понад 380 тис. контейнерів IoT-датчиками для дистанційного моніторингу температури, вологості та місцеперебування. Це дало змогу скоротити час перевірок вантажів з 12–24 годин до кількох хвилин, мінімізувати втрати швидкопсувної продукції та зменшити витрати на технічне обслуговування. Завдяки предиктивному аналізу даних Maersk також скоротив викиди CO₂ на близько 2400 тон на рік, що свідчить про зростання енергоефективності й сталості логістичного ланцюга [26].

Не менш показовим є досвід Harley-Davidson — виробника мотоциклів, який модернізував свій завод у Йорку (США) відповідно до принципів «розумного виробництва». Встановлення IoT-сенсорів на виробничих ділянках дозволило відстежувати стан обладнання й потоки матеріалів у реальному часі, що скоротило виробничий цикл з трьох тижнів до шести годин і підвищило прибутковість компанії на 3–4% [27, 28]. Таким чином, цифрова інтеграція процесів дала змогу не лише зменшити витрати, а й скоротити сам ланцюг створення вартості завдяки усуненню проміжних затримок і узгоджень.

Поруч із ланцюгами створення вартості, технологія Інтернету речей також впливає на моделі міжагентної взаємодії, створюючи «живі» мережі між агентами та об'єктами. У межах таких мереж об'єкти — машини, транспортні засоби, склади чи інфраструктурні елементи — стають активними учасниками координаційних процесів. Вони передають дані про власний стан, навантаження або середовище, забезпечуючи безперервний зворотний зв'язок між економічними агентами. Це дозволяє не лише оперативнo узгоджувати рішення, а й формувати нову модель довіри, засновану на даних, що

генеруються безпосередньо в процесі діяльності. Таким чином, IoT розширює простір міжагентної взаємодії, інтегруючи у нього «розумні» об'єкти, які виконують функції спостереження, діагностики та попередження відхилень.

Показовим прикладом такої трансформації є компанія Rolls-Royce, що спеціалізується на виробництві авіадвигунів. Завдяки інтеграції технології IoT компанія перейшла від традиційної моделі разового продажу двигунів до сервісної концепції Power by the Hour, у межах якої двигуни оснащуються сенсорами, що передають дані про свій стан у режимі реального часу. Це дало змогу Rolls-Royce підтримувати постійну взаємодію з авіаперевізниками: моніторинг понад 13 000 двигунів дозволяє прогнозувати знос, планувати технічне обслуговування та мінімізувати незаплановані простої. У результаті компанія сформувала цифрову сервісну мережу, у якій інтереси виробника й клієнта вирівнюються навколо спільної мети — забезпечення максимальної доступності авіаційної техніки [29-31].

Схожих принципів дотримується ThyssenKrupp Elevator — один із найбільших світових виробників ліфтового обладнання. Компанія інтегрувала IoT у понад 1,1 млн ліфтів, які передають дані про температуру двигунів, положення дверей і швидкість руху до єдиної хмарної системи. Це дозволяє сервісним командам отримувати сповіщення про потенційні несправності ще до зупинки ліфта [32]. Така модель взаємодії перетворює звичайну реактивну систему обслуговування на проактивну: замість реагування на поломки компанія забезпечує попереджувальний ремонт, що скорочує простої та підвищує безпеку користувачів.

Важливий приклад у сфері логістики демонструє Maersk, яка запровадила систему Remote Container Management (RCM) для моніторингу понад 300 000 рефрижераторних контейнерів. Завдяки IoT-датчикам інформація про температуру, вологість і місцеположення вантажів передається в реальному часі всім учасникам перевезення — від перевізників до одержувачів. Це дозволило скоротити час простою суден у портах приблизно на 30%, а втрати від псування вантажів — на мільйони доларів щороку [33, 34]. Таким чином, IoT створив єдине інформаційне середовище, де координація між агентами ґрунтується на спільному доступі до об'єктивних даних.

Ще один приклад — компанія Michelin, яка впровадила систему відстеження контейнерів SafeCube на базі IoT для моніторингу перевезення шин. Кожен контейнер обладнано сенсорами, що фіксують місцеположення, температуру й вологість. Ця система об'єднує понад двадцять різних організацій — від морських ліній до залізничних і автоперевізників — у єдину прозору мережу. У

результаті точність прогнозування часу прибуття вантажів зросла на 40%, а середня тривалість доставки скоротилася на 10% [35]. Така інтеграція забезпечила Michelin не лише ефективніше управління запасами, а й нову модель співпраці з логістичними партнерами на основі спільних даних.

Наведені приклади показують, що Інтернет речей радикально змінює логіку міжагентної взаємодії. Виробники, постачальники й споживачі формують «живі» цифрові екосистеми, у яких координація рішень і контроль відбуваються в реальному часі. IoT створює нову архітектуру співпраці — прозору, самоврегульовану та побудовану на довірі до даних, що стає фундаментом ефективності в економіці Індустрії 4.0.

Отже, проведений аналіз кейсів дозволяє не лише підтвердити позитивний вплив технологій Індустрії 4.0 на господарські процеси, а й виявити характер цього впливу за окремими структурними чинниками. Для надання оцінці більшої аналітичної глибини доцільно узагальнити отримані кількісні результати за кожною технологією та відповідними чинниками господарської діяльності, розрахувавши інтегральний показник для кожної комірки оновленої матриці. Розрахунок інтегрального ефекту здійснюється за формулою:

$$E_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} \Delta_k$$

де: E_{ij} — інтегральний ефект для комірки матриці, яка відповідає певній технології (i) та певному чиннику (j) господарської діяльності;

n_{ij} — кількість кейсів (емпіричних спостережень), що стосуються цієї конкретної комірки;

Δ_k — кількісний ефект (зміна у відсотках, грошах, часі, продуктивності тощо) для k -го кейсу в межах цієї комірки.

Розрахунок інтегрального показника для кожної технології (за рядком матриці) та чинником господарської діяльності (за стовпчиком матриці) здійснюється за формулами:

$$R_i = \frac{\sum_j \omega_{ij} E_{ij}}{\sum_j \omega_{ij}}, \quad C_j = \frac{\sum_i \omega_{ij} E_{ij}}{\sum_i \omega_{ij}}$$

де: R_i — інтегральний показник впливу технології i на господарську систему в цілому;

C_j — інтегральний показник чутливості чинника j до впливу технологій Індустрії 4.0;

E_{ij} — інтегральний ефект у комірці для технології i та чинника j ;

ω_{ij} — вага, що відображає надійність комірки;

$\sum_j \omega_{ij}$ — сума ваг усіх комірок у рядку (для нормалізації).

$$\omega_{ij} = \sqrt{n_{ij}}$$

Отже, з результатів розрахунку, представлених у матриці (рис. 2), випливає, що технології Індустрії 4.0 демонструють різний рівень системного впливу на господарські процеси. Найвищі інтегральні показники спостерігаються у категорії «ланцюги створення вартості», що відображає прямий вплив робототехніки, 3D-друку, хмарних обчислень та Інтернету речей на скорочення виробничих циклів, підвищення гнучкості й точності операцій. Водночас технології великих даних і блокчейн проявляють себе насамперед у сфері міжагентної взаємодії та зниження трансакційних витрат, формуючи нові цифрові механізми довіри, прозорості та координації. Сукупно ці результати підтверджують, що ефект від застосування технологій Індустрії 4.0 має комплексний характер — поєднуючи технологічну, організаційну та інституційну складові підвищення ефективності економічних систем.

Водночас слід зауважити, що отримані результати не претендують на повну репрезентативність. Їх аналітична база сформована на основі обмеженої кількості кейсів, відібраних за принципом показовості, а не статистичної вибірки. Тому матриця відображає не точні середньогалузеві значення, а інтегральні оцінки емпіричних ефектів, які узагальнюють типові тенденції впливу технологій Індустрії 4.0. При цьому вона має наукову цінність як результат аналітичної оцінки ефективності цифрових технологій — один із ключових аргументів, що емпірично підтверджують їх здатність трансформувати господарські процеси. Таким чином, наведена матриця не є вичерпною оцінкою, а слугує вагомим елементом комплексного обґрунтування ефективності технологій Індустрії 4.0.

Для посилення емпіричної обґрунтованості результатів оцінки впливу технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності доцільно доповнити аналіз кейсів метааналізом міжнародних досліджень та аналітичних звітів провідних консалтингових компаній (McKinsey, PwC, Deloitte, Accenture, OECD, World Economic Forum тощо). Такі джерела містять узагальнені кількісні оцінки впливу окремих технологій Індустрії 4.0 на скорочення трансакційних витрат, підвищення ефективності ланцюгів створення вартості та трансформацію моделей міжагентної взаємодії. Узгодження отриманих у межах дослідження інтегральних показників із результатами цих звітів дозволяє не лише перевірити внутрішню логіку зроблених висновків, а й співвіднести їх із глобальними емпіричними тенденціями цифрової трансформації.







| Технологія | Трансакційні витрати (ТВ) | Ланцюги створення вартості (ЛСВ) | Моделі міжгентної взаємодії (МВВ) | Інтегральний показник за технологіями (R_i) |
|---|--|--|---|---|
|  Великі дані | _____ | +16 % (продуктивність прогнозування) | +53,7 % (швидкість ухвалення рішень, координація) | +35 % (ефективність) |
|  3D-друк | _____ | -56,5 % (привалість виробничого циклу, час) | _____ | -56,5 % (скорочення часу) |
|  Блокчейн | -70 % (витрати на перевірку угоди, час) | _____ | -69,5 % (адмін., витрати, час узгодження) | -69,8 % (зменшення трансакційних витрат) |
|  Робототехніка | _____ | +68 % (продуктивність, якість виконання) | _____ | +68 % (зростання продуктивності) |
|  Хмарні обчислення | _____ | -28,3 % (витрати на інфраструктуру, час обробки) | _____ | -28,3 % (скорочення витрат) |
|  Інтернет речей | _____ | +35 % (зменшення простоя, оптимізація запасів) | +45 % (ефективність сервісної взаємодії) | -40 % (зростання ефективності) |
| Інтегральний показник за чинниками господарської діяльності (C_j) | ≈ 70 % (зменшення витрат / часу перевірки) | ≈ 40 % (підвищення продуктивності / скорочення часу) | ≈ 55 % (покращення координації / прозорості) | _____ |

Рисунок 2. Інтегральна матриця кількісних ефектів технологій Індустрії 4.0 за результатами аналізу кейсів¹

¹ Інтегральні показники (E_{ij} , R_i , C_j) подано у відсотках (%) і відображають середню відносну зміну відповідних параметрів (витрат, часу, продуктивності, ефективності) за результатами аналізу емпіричних кейсів.

Отже, за результатами аналізу досліджень консалтингових компаній та звітів міжнародних організацій встановлено, що технології Індустрії 4.0 чинять істотний позитивний вплив на ключові інституційно-економічні чинники господарської діяльності (табл. 1). Так, у сфері трансакційних витрат найбільш виражений ефект мають блокчейн та штучний інтелект, які забезпечують скорочення витрат на перевірку, аудит, посередництво та укладення угод — до 30 % адміністративних витрат та до 80 % часу обробки контрактів. У контексті ланцюгів створення вартості особливо ефективними виявились великі дані, робототехніка, хмарні обчислення та IoT, що забезпечують підвищення продуктивності на 15–25 %, скорочення простоїв до 50 % і потенціал додаткової вартості в трильйонному еквіваленті. У сфері моделей міжагентної взаємодії інтеграція хмарних платформ, IoT і ШІ сприяє формуванню цифрових екосистем, де зростає прозорість, довіра та узгодженість дій — підвищення операційної ефективності на 26 % та зниження затримок у постачанні до 25 %. Ці висновки підтверджують емпіричну обґрунтованість інтегральних показників, розрахованих на основі кейс-аналізу, і виступають додатковим аргументом на користь економічної ефективності технологій Індустрії 4.0.

Для додаткового посилення обґрунтованості результатів оцінки впровадження цифрових технологій доцільно залучити інструмент, що поєднує емпіричний досвід, теоретико-аналітичні узагальнення та фахову експертизу. У цьому контексті оптимальним є застосування методу Делфі — багатоетапного підходу до експертного опитування, який дозволяє сформуванню узгоджену думку професіоналів галузі та інтегрувати її в логіку дослідження. Такий підхід доповнює результати кейс-аналізу та метааналізу консалтингових джерел, формуючи третій — експертно-інтерпретаційний — рівень доказової бази. Це забезпечує вищу інтерпретаційну надійність висновків і дозволяє врахувати не лише наявні ефекти, а й стратегічні оцінки та прогнози фахівців.

Згідно з результатами міжнародних досліджень, 92% представників виробничого сектору розглядають технології Індустрії 4.0 як критично важливий чинник збереження конкурентоспроможності протягом найближчих трьох років, а 85% уже фіксують трансформацію операційних моделей під їхнім впливом [42]. На основі узагальнених експертних оцінок нижче наведено систематизований аналіз ефективності ключових технологій Індустрії 4.0.

Великі дані (Big Data) розглядаються фахівцями як один із фундаментальних елементів цифрової трансформації, що відкриває

Таблиця 1. Вплив технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності
(за результатами метааналізу міжнародних досліджень)

| № | Чинник впливу | Технології Індустрії 4.0 з найбільш вираженим ефектом | Характер впливу / основні результати | Кількісна оцінка ефекту | Джерело / рік |
|---|--|---|---|---|--|
| 1 | Трансакційні витрати | Блокчейн | Скорочення витрат на узгодження, перевірку та аудит даних; автоматизація підтвердження угод; підвищення прозорості операцій | Зниження операційних і комплаєнс-витрат у фінансовому секторі на 15–20 %; економія до 15–20 млрд дол. США щорічно у світовому масштабі | PwC (2017) <i>Blockchain – A new tool to cut costs</i> [36] |
| 2 | Ланцюги створення вартості | Великі дані, робототехніка, 3D-друк, хмарні обчислення | Оптимізація виробничих процесів, скорочення простоїв, підвищення продуктивності праці, інтеграція етапів постачання й виробництва | Підвищення продуктивності конверсійних процесів на 15–25 %; потенціал створення додаткової вартості \approx 3,7 трлн дол. США до 2025 р. | McKinsey & Company (2015) <i>Industry 4.0: Capturing Value at Scale in Discrete Manufacturing</i> [37] |
| 3 | Моделі міжагентної взаємодії | Хмарні обчислення, IoT, ШІ | Формування цифрових мереж взаємодії між партнерами; автоматизація комунікацій і управління сервісами; зростання прозорості й довіри | Підприємства, що інтегрували цифрові екосистеми, отримують у середньому на 26 % вищу операційну ефективність і на 20 % вищу клієнтську лояльність | Deloitte (2024) <i>Optimizing Digital Ecosystems to Create More Value</i> [38] |
| 4 | Ланцюги створення вартості (додатково) | IoT | Підвищення точності планування виробництва, моніторинг у реальному часі, мінімізація втрат і простоїв | Зменшення витрат на технічне обслуговування на 25–30 %; скорочення простоїв обладнання на до 50 % | Accenture (2020) <i>The Internet of Things: Powering the Digital Economy</i> [39] |
| 5 | Трансакційні витрати (додатково) | ШІ у контрактах | Зменшення потреби в посередниках, швидше укладання угод, точніше ціноутворення | Скорочення часу укладання угод на \approx 80 %; зниження адміністративних витрат на до 30 % | OECD (2021) <i>AI in Business and Finance Report</i> [40] |
| 6 | Моделі міжагентної взаємодії (додатково) | IoT + ШІ + хмарні обчислення в екосистемах постачальників | Інтеграція даних між постачальниками, логістами й виробниками; поява спільних інформаційних платформ | Підвищення узгодженості операцій на 35 %; зниження затримок у постачанні на до 25 % | World Economic Forum (2022) <i>Global Lighthouse Network Report</i> [41] |

можливості для впровадження data-driven підходів — тобто управлінських рішень, які ґрунтуються не на інтуїції чи досвіді, а на об'єктивному аналізі великих обсягів даних. Така модель передбачає використання аналітичних інструментів для виявлення закономірностей, формування прогнозів і підтримки стратегічного планування. Завдяки цьому компанії отримують змогу оперативно приймати обґрунтовані рішення, підвищувати точність планування, знижувати операційні витрати та покращувати якість продукції [43]. При цьому понад 38% підприємств уже розглядають аналітичні рішення як самостійний бізнес-продукт і комерціалізують їх, пропонуючи сервіси великих даних зовнішнім клієнтам, що свідчить про здатність аналітики генерувати додану бізнес-цінність [44].

3D-друк демонструє високу ефективність у забезпеченні гнучкості постачання та локалізації виробництва. Під час глобальних логістичних збоїв (зокрема пандемії COVID-19) аддитивні технології дозволили оперативно виготовляти критичні деталі, компенсуючи дефіцити. Експерти також підкреслюють можливість формування нових моделей кооперації через мікровиробництва, які функціонують на основі цифрового обміну моделями та локального друку [45].

Блокчейн, за оцінками фахівців, має трансформаційний потенціал у сферах контракування, перевірки та аудиту. Автоматизація процесів через смарт-контракти дозволяє знизити витрати на укладення угод і аудит до 30% [46]. У публічних закупівлях блокчейн уже продемонстрував здатність покращити прозорість і довіру між учасниками. Особливо перспективним є його поєднання з Інтернетом речей — створюючи автономні мережі для децентралізованого управління та інтегрованого контролю.

Інтернет речей (IoT) забезпечує зв'язок між фізичними об'єктами, сенсорами, транспортними засобами і виробничими потужностями, формуючи єдину цифрову інфраструктуру управління. Завдяки збору даних у реальному часі підприємства можуть здійснювати передбачуване технічне обслуговування, оптимізувати логістику і прогнозувати попит. Ключові приклади ефективності — кейси Toyota і Walmart, де було досягнуто скорочення простоїв, підвищення рівня обслуговування клієнтів і оптимізація запасів [43].

Робототехніка відіграє провідну роль у підвищенні продуктивності праці та якості виробництва. Експерти фіксують приріст продуктивності до 20% після впровадження промислових роботів, а також зниження дефектності, витрат на переробку і покращення умов безпеки працівників [47]. Хоча автоматизація може зумовити скорочення зайнятості у певних сферах, вона водночас створює нові

можливості для працевлаштування в галузях програмування, обслуговування та інженерії.

Хмарні обчислення забезпечують гнучку, масштабовану інфраструктуру для зберігання, обробки та обміну даними. Вони виступають базисом для інтеграції ланцюгів створення вартості — об'єднуючи постачальників, виробників і дистриб'юторів у спільному цифровому середовищі. Хмари підтримують аналіз великих обсягів IoT-даних, що дозволяє впроваджувати штучний інтелект і машинне навчання без значних капіталовкладень у локальну IT-інфраструктуру [43, 44].

Узагальнюючи вищезазначене, слід наголосити, що експертна думка, отримана за методологією Делфі, є узгодженою і підтверджує високу ефективність ключових технологій Індустрії 4.0. Вони не лише зменшують транзакційні витрати та оптимізують внутрішні процеси, але й формують нові гнучкі моделі взаємодії між учасниками ринку. Це дозволяє розглядати ці технології як системні чинники довгострокової конкурентоспроможності підприємств у цифрову епоху. Візуалізація ключових ефектів, отриманих за допомогою методу Делфі, представлена на рисунку 3.

Висновки. Отже, для оцінки ефективності технологій Індустрії 4.0 у даному дослідженні було застосовано комплексний підхід, що поєднує три методи, кожен із яких репрезентує окремий рівень аналітичної глибини: емпіричний, теоретико-аналітичний та експертно-інтерпретаційний. Таке багаторівневе охоплення дозволяє забезпечити збалансовану оцінку, яка спирається одночасно на фактичні результати, системні узагальнення та галузеву експертизу. На початковому — емпіричному рівні — здійснено аналіз конкретних кейсів впровадження цифрових технологій на підприємствах. Це дало змогу виявити прямі ефекти цифровізації, такі як зростання продуктивності, зниження витрат чи покращення логістичних процесів. Сильна сторона цього підходу — його фактологічна насиченість та практична перевірка гіпотез на реальних прикладах. Водночас, результати таких кейсів можуть мати обмежений ступінь узагальнення, оскільки вони тісно прив'язані до контексту кожного окремого підприємства, його галузевої специфіки та масштабів діяльності.

Для компенсації обмежень методу аналізу кейсів, було використано теоретико-аналітичний підхід, який спирається на результати метааналізу публікацій провідних консалтингових компаній та міждисциплінарних оглядів. Завдяки цьому вдалося інтегрувати ширший спектр даних, що охоплює десятки країн і тисячі підприємств. Аналітичні огляди дають змогу простежити глобальні тен-

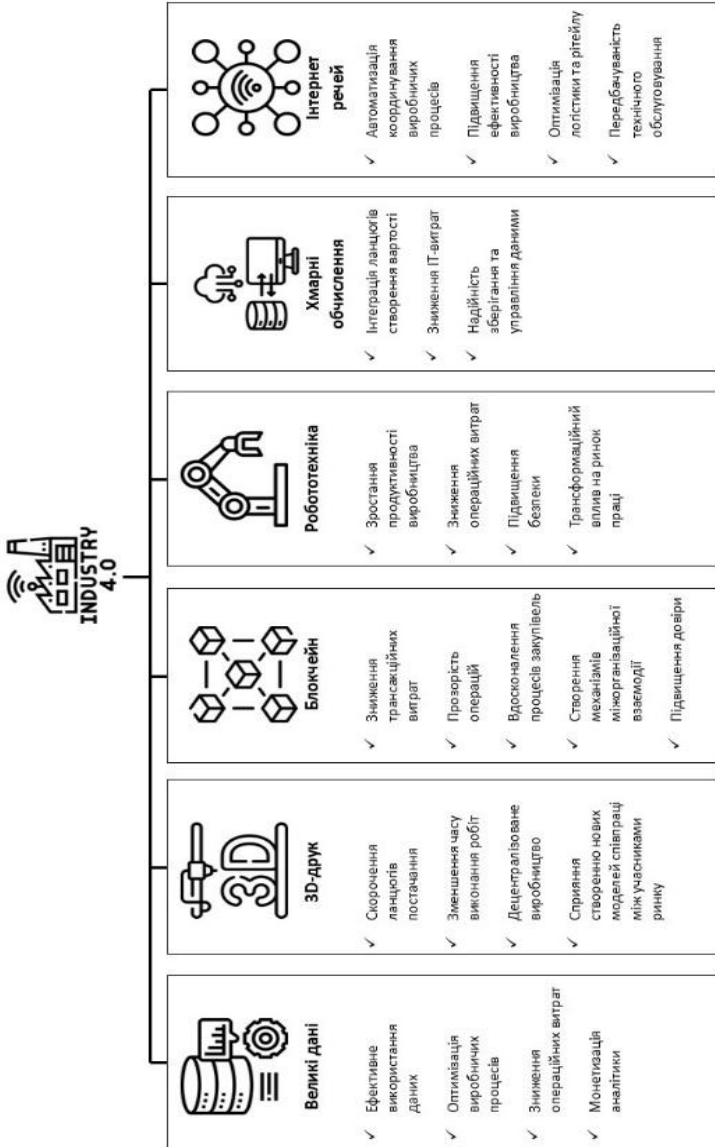


Рисунок 3. Узагальнені ефекти впровадження технологій Індустрії 4.0 (за результатами експертного опитування методом Делфі)

денції, стандарти цифрового переходу та найкращі практики в інтеграції технологій Індустрії 4.0. Перевага цього рівня — глибина концептуального узагальнення, однак він рідко дає змогу оцінити індивідуальні контекстуальні відмінності чи прогностні ризики.

Щоб доповнити емпіричну базу та аналітичну рамку якісними інтерпретаціями та експертними судженнями, у дослідженні було застосовано метод Делфі, який репрезентує експертно-інтерпретаційний рівень. Цей метод ґрунтується на багатоетапному анкетуванні фахівців із поступовою фіксацією і узгодженням оцінок, що дозволяє сформуванню колективну думку експертного середовища. Саме такий підхід дозволяє врахувати не лише наявні ефекти, але й потенціал трансформацій, стратегічні очікування та ймовірні бар'єри впровадження. Метод Делфі цінний своєю здатністю формувати прогностну логіку аналізу на основі узгодженої думки професійної спільноти. Основним його обмеженням є залежність від суб'єктивних оцінок, що, однак, мінімізується завдяки процедурам контролю узгодженості та анонімності відповідей

Відтак, завдяки поєднанню зазначених підходів вдалося сформуванню всебічну оцінку ефективності технологій Індустрії 4.0, де практичні дані підкріплюються теоретичними висновками та доповнюються глибоким розумінням і прогнозами експертів, що створює багатовимірну аналітичну основу дослідження. Взаємодоповнення трьох рівнів дозволяє розглядати результати не як ізольовані спостереження, а як частину інтегрованої системи доказів. Ця логіка методологічної побудови узагальнена та візуалізована на рисунку 4, який демонструє трирівневу піраміду аналітичного осмислення ефективності Індустрії 4.0: від емпіричних даних — через аналітичні узагальнення — до інтерпретаційної експертизи.

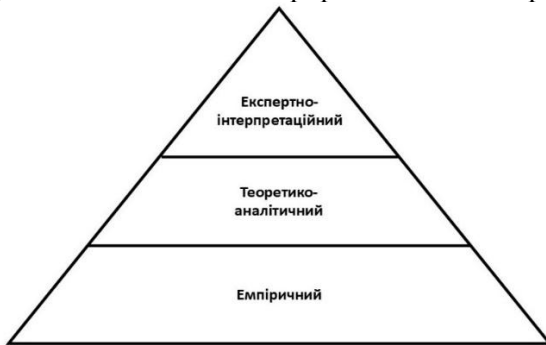


Рисунок 4. Рівні аналітичного осмислення ефективності технологій Індустрії 4.0

Таким чином, наукове значення запропонованого підходу полягає в отриманні багатовимірних результатів оцінки ефективності технологій Індустрії 4.0 та у створенні цілісної методологічної конструкції, що забезпечує послідовне нарощування глибини аналізу. Така структура дозволяє діагностувати наявні ефекти та інтерпретувати їх у ширшому контексті цифрової трансформації, формуючи аналітичну рамку, придатну для подальших досліджень, порівнянь і стратегічного прогнозування.

ЛІТЕРАТУРА

1. UPS saves over 10 million gallons of fuel and up to \$400m in costs annually with advanced telematics and analysis. *Best Practice AI*. URL: https://www.bestpractice.ai/ai-case-study-best-practice/ups_saves_over_10_million_gallons_of_fuel_and_up_to_%24400m_in_costs_annually_with_advanced_telematics_and_analysis (accessed: 01.10.2025).
2. Walmart's Transformation Through Data Analytics. *Transights*. 2024. URL: <https://www.tran-sights.com/blogs/post/walmart-s-transformation-through-data-analytics> (accessed: 01.10.2025).
3. How Big Data Analysis helped increase Walmarts Sales turnover? *ProjectPro*. 2024. URL: <https://www.projectpro.io/article/how-big-data-analysis-helped-increase-walmarts-sales-turnover/109> (accessed: 01.10.2025).
4. Building Value with Big Data. *CATERPILLAR*. 2022. URL: <https://www.caterpillar.com/content/caterpillarDotCom/en/news/caterpillarNews/2022/ar-big-data.html/> (accessed: 01.10.2025).
5. Why Netflix thinks its personalized recommendation engine is worth \$1 billion per year. *BUSINESS INSIDER*. 2016. URL: <https://www.businessinsider.com/netflix-recommendation-engine-worth-1-billion-per-year-2016-6> (accessed: 01.10.2025).
6. Walmart and the New Supply Chain Reality: AI, Automation, and Resilience. *LOGISTICS VIEWPOINTS*. URL: <https://logisticsviewpoints.com/2025/03/19/walmart-and-the-new-supply-chain-reality-ai-automation-and-resilience/> (accessed: 10.10.2025).
7. Strengthening the Execution of Our Strategy. *P&G*. URL: <https://us.pg.com/annualreport2024/strengthening-the-execution-of-our-strategy/> (accessed: 10.10.2025).
8. Case study: The value of sharing data in supply chain optimization. *OPEN DATA INSTITUTE*. URL: <https://theodi.org/insights/impact-stories/case-study-the-value-of-sharing-data-in-supply-chain-optimisation/> (accessed: 10.10.2025).
9. PortXchange results in shorter idle times on departure at APM Terminals Rotterdam. *PortXchange*. URL: <https://port-xchange.com/reduce-idle-time-on-departure/> (accessed: 10.10.2025).
10. Additive Layer Manufacturing: Building the Future One Layer at a Time. *Constellium*. URL: <https://www.constellium.com/news/additive-layer-manufacturing-building-the-future-one-layer-at-a-time> (accessed: 12.10.2025).
11. Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. *UltiMaker*. URL: <https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures/> (accessed: 12.10.2025).
12. Adidas SpeedFactory: “Shoe”rtening Its Supply Chain with 3D Printing. *DIGITAL INITIATIVE*. URL: <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/adidas-speedfactory-shoertening-its-supply-chain-with-3d-printing/> (accessed: 12.10.2025).
13. 3D Printing the Future of Rail at Deutsche Bahn. *DIGITAL INITIATIVE*. 2018. URL: <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/3d-printing-the-future-of-rail-at-deutsche-bahn/> (accessed: 12.10.2025).

14. How Industrial 3D Printing Can Benefit Your Supply Chain. *EOS*. URL: <https://www.eos.info/content/blog/supply-chain> (accessed: 12.10.2025).
15. Walmart and Block Chain: It Takes Two to Mango. *DIGITAL INITIATIVE*. 2017. URL: <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/walmart-and-block-chain-it-takes-two-to-mango/> (accessed: 13.10.2025).
16. Blockchain – The case for digitalising shipping. *WÄRTSILÄ*. 2019. URL: <https://www.wartsila.com/insights/article/blockchain-the-case-for-digitalising-shipping> (accessed: 13.10.2025).
17. EY, Microsoft expand Xbox royalties blockchain. *Ledger Insights*. 2020. URL: <https://www.ledgerinsights.com/ey-microsoft-expand-xbox-royalties-management-blockchain/> (accessed: 13.10.2025).
18. HSBC Makes First Blockchain Trade Transaction. *Investopedia*. 2018. URL: <https://www.investopedia.com/news/hsbc-makes-first-blockchain-trade-transaction/> (accessed: 13.10.2025).
19. Blockchain Energizer. *Klgates*. 2018. URL: <https://www.klgates.com/Blockchain-Energizer--Volume-39-12-06-2018> (accessed: 13.10.2025).
20. ABB's cobots boost productivity by 68 % on Electrolux's refrigerator production line. *IFR International Federation of Robotic*. 2024. URL: <https://ifr.org/case-studies/abbs-collaborative-robots-boost-productivity-by-68-on-electroluxs-refrigerator-production-line> (accessed: 14.10.2025).
21. From Factory Floors to Cloud Soars: How Cloud-Based Supply Chain Management is Revolutionizing Manufacturing. *DATA DYNAMICS*. URL: <https://www.data-dynamicsinc.com/quick-bytes-from-factory-floors-to-cloud-soars-how-cloud-based-supply-chain-management-is-revolutionizing-manufacturing/> (accessed: 14.10.2025).
22. The Volkswagen Group on AWS. *AWS*. URL: <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/innovators/volkswagen-group/> (accessed: 14.10.2025).
23. Takeda brings clinical data to life for AI. *Informatica*. URL: <https://www.informatica.com/customer-success-stories/takeda.html> (accessed: 14.10.2025).
24. What RFID Walmart 's RFID Expansion Means for the Industry. *RFID label*. URL: <https://www.rfidlabel.com/what-walmarts-rfid-expansion-means-for-the-industry-rfid-walmart/> (accessed: 15.10.2025).
25. Report: Amazon Warehouse Robots Increased By 50% Last Year. *INDUSTRIAL DISTRIBUTION*. 2017. URL: <https://www.inddist.com/business-technology/news/13773416/report-amazon-warehouse-robots-increased-by-50-last-year> (accessed: 15.10.2025).
26. Automation in Shipping: Maersk Sets Benchmarks in Reefer Monitoring. *tsc*. 2021. URL: <https://www.tcs.com/what-we-do/industries/travel-and-logistics/case-study/maersk-cloud-iot-platform-automate-reefer-monitoring-system> (accessed: 15.10.2025).
27. IoT for Operational Efficiency in the Manufacturing Sector. *DIGI*. 2024. URL: <https://www.digi.com/blog/post/iot-for-operational-efficiency-in-manufacturing> (accessed: 15.10.2025).
28. How IoT Is Spawning Better Business Models. *Consagous*. URL: <https://www.consagous.co/blog/how-iot-is-spawning-better-business-models> (accessed: 15.10.2025).
29. Rolls-Royce: Optimising jet engine maintenance with machine learning. *DIGITAL INITIATIVE*. 2018. URL: <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/rolls-royce-optimising-jet-engine-maintenance-with-machine-learning/> (accessed: 15.10.2025).
30. Powering better performance and customer experience with Internet of Engines. *ROLLS ROYCE*. URL: <https://www.rolls-royce.com/country-sites/sea/our-stories/2019/delivering-better-engine-performance-with-iot.aspx> (accessed: 15.10.2025).
31. Rolls-Royce adopts AI software to maximise engine availability. *AERO-SPACE MANUFACTURING*. 2018. URL: <https://www.aero-mag.com/rolls-royce-adopts-ai-software-to-maximise-engine-availability> (accessed: 15.10.2025).

32. How Real-Time Data Keeps Elevators Running. *RTInsights.com*. 2016. URL: <https://www.rtinsights.com/elevator-maintenance-predictive-machine-learning/> (accessed: 15.10.2025).
33. Maersk Line technology saves millions for reefer cargo owners. *riviera*. 2017. URL: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/maersk-line-technology-saves-millions-for-reefer-cargo-owners-28074> (accessed: 15.10.2025).
34. Maersk – Reinventing the Shipping Industry Using IoT and Blockchain. *DIGITAL DATA DESIGN INSTITUTE*. 2018. URL: <https://d3.harvard.edu/maersk-reinventing-shipping-industry-using-iot-blockchain/> (accessed: 15.10.2025).
35. Michelin keeps tire shipments rolling with help of IoT trackers. *DC VELOCITY*. 2019. URL: <https://www.dvelocity.com/articles/30912-michelin-keeps-tire-shipments-rolling-with-help-of-iot-trackers> (accessed: 15.10.2025).
36. Blockchain – A new tool to cut costs. *PWC*. 2017. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/financial-services/publications/blockchain.html> (accessed: 20.10.2025).
37. Industry 4.0: Capturing Value at Scale in Discrete Manufacturing. *McKinsey & Company*. 2015. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/manufacturings-next-act> (accessed: 20.10.2025).
38. Optimizing Digital Ecosystems to Create More Value. *Deloitte*. 2024. URL: <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/strategy-operations/articles/optimizing-digital-ecosystems.html> (accessed: 20.10.2025).
39. The Internet of Things: Powering the Digital Economy. *Accenture*. 2020. URL: <https://www.accenture.com/us-en/insights/internet-of-things/iot-digital-economy> (accessed: 20.10.2025).
40. AI in Business and Finance Report. *OECD*. 2021. URL: <https://www.oecd.org/finance/ai-in-business-and-finance.htm> (accessed: 20.10.2025).
41. Global Lighthouse Network: Unlocking Sustainability through 4IR. *World Economic Forum*. 2022. URL: <https://www.weforum.org/reports/global-lighthouse-network-unlocking-sustainability-through-4ir/> (accessed: 20.10.2025).
42. 2025 Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating challenges to implementation. *Deloitte Insights*. 2025. URL: <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html> (accessed: 23.10.2025).
43. Janik S., Mlkva M., Mareček-Kolibiský M. Effective Data Utilization in the Context of Industry 4.0 Technology Integration. *MDPI*. 2022. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/20/10517> (accessed: 23.10.2025).
44. Industry 4.0: Building the digital enterprise. *pwc*. 2016. URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf> (accessed: 23.10.2025).
45. Meyer M., Glas A., Eßig M. A Delphi study on the supply risk-mitigating effect of additive manufacturing during SARS-COV-2. *Journal of Purchasing and Supply Management*. 2022. Vol. 28, Iss. 4, Art. 100791. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2022.100791>
46. Alhabatah A., Yaqot M., Menezes B., Kerbache L. Transformative Procurement Trends: Integrating Industry 4.0 Technologies for Enhanced Procurement Processes. *Logistics*. 2023. Vol. 7, Iss. 3, Art. 63. <https://doi.org/10.3390/logistics7030063>
47. Imoh I., Aniekan E. A Technical Survey on The Role of Robotics in Conventional Manufacturing Process: An Element of Industry 4.0. *FUPRE Journal of Scientific and Industrial Research*. 2024. Vol. 8, Iss. 2. P. 172-192. URL: https://www.researchgate.net/publication/378310688_A_Technical_Survey_on_The_Role_of_Robotics_in_Conventional_Manufacturing_Process_An_Element_of_Industry_4_0 (accessed: 23.10.2025).

Надійшла до редакції 02.11.2025 р.
Прийнята до друку 05.12.2025 р.

REFERENCES

1. UPS saves over 10 million gallons of fuel and up to \$400m in costs annually with advanced telematics and analysis. (n.d.). *Best Practice AI*. Retrieved 2025, October 1 from https://www.bestpractice.ai/ai-case-study-best-practice/ups_saves_over_10_million_gallons_of_fuel_and_up_to_%24400m_in_costs_annually_with_advanced_telema_tics_and_analysis
2. Walmart's Transformation Through Data Analytics. (2024). *Transights*. <https://www.tran-sights.com/blogs/post/walmart-s-transformation-through-data-analytics>
3. How Big Data Analysis helped increase Walmart's sales turnover? (2024). *ProjectPro*. <https://www.projectpro.io/article/how-big-data-analysis-helped-increase-walmarts-sales-turnover/109>
4. Building Value with Big Data. (2022). *Caterpillar*. <https://www.caterpillar.com/content/caterpillarDotCom/en/news/caterpillarNews/2022/ar-big-data.html>
5. Why Netflix thinks its personalized recommendation engine is worth \$1 billion per year. (2016). *Business Insider*. <https://www.businessinsider.com/netflix-recommendation-engine-worth-1-billion-per-year-2016-6>
6. Walmart and the New Supply Chain Reality: AI, Automation, and Resilience. (2025). *Logistics Viewpoints*. <https://logisticsviewpoints.com/2025/03/19/walmart-and-the-new-supply-chain-reality-ai-automation-and-resilience/>
7. Strengthening the Execution of Our Strategy. (2024). *Procter & Gamble*. <https://us.pg.com/annualreport2024/strengthening-the-execution-of-our-strategy/>
8. Case study: The value of sharing data in supply chain optimization. (2022). *Open Data Institute*. <https://theodi.org/insights/impact-stories/case-study-the-value-of-sharing-data-in-supply-chain-optimisation/>
9. PortXchange results in shorter idle times on departure at APM Terminals Rotterdam. (2024). *PortXchange*. <https://port-xchange.com/reduce-idle-time-on-departure/>
10. Additive Layer Manufacturing: Building the Future One Layer at a Time. (2024). *Constellium*. <https://www.constellium.com/news/additive-layer-manufacturing-building-the-future-one-layer-at-a-time>
11. Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures. (2024). *UltiMaker*. <https://ultimaker.com/learn/volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures/>
12. Adidas SpeedFactory: "Shoe"rtening Its Supply Chain with 3D Printing. (2018). *Digital Initiative*. <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/adidas-speedfactory-shoertening-its-supply-chain-with-3d-printing/>
13. 3D Printing the Future of Rail at Deutsche Bahn. (2018). *Digital Initiative*. <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/3d-printing-the-future-of-rail-at-deutsche-bahn/>
14. How Industrial 3D Printing Can Benefit Your Supply Chain. (2024). *EOS*. <https://www.eos.info/content/blog/supply-chain>
15. Walmart and Blockchain: It Takes Two to Mango. (2017). *Digital Initiative*. <https://d3.harvard.edu/platform-rctom/submission/walmart-and-block-chain-it-takes-two-to-mango/>
16. Blockchain – The case for digitalising shipping. (2019). *Wärtsilä*. <https://www.wartsila.com/insights/article/blockchain-the-case-for-digitalising-shipping>
17. EY, Microsoft expand Xbox royalties blockchain. (2020). *Ledger Insights*. <https://www.ledgerinsights.com/ey-microsoft-expand-xbox-royalties-management-blockchain/>
18. HSBC makes first blockchain trade transaction. (2018). *Investopedia*. <https://www.investopedia.com/news/hsbc-makes-first-blockchain-trade-transaction/>
19. Blockchain Energizer. (2018). *K&L Gates*. <https://www.klgates.com/Blockchain-Energizer--Volume-39-12-06-2018>

20. ABB's cobots boost productivity by 68% on Electrolux's refrigerator production line. (2024). *International Federation of Robotics*. <https://ifr.org/case-studies/abbs-collaborative-robots-boost-productivity-by-68-on-electroluxs-refrigerator-production-line>

21. From Factory Floors to Cloud Soars: How Cloud-Based Supply Chain Management is Revolutionizing Manufacturing. (2024). *Data Dynamics*. <https://www.datadynamicsinc.com/quick-bytes-from-factory-floors-to-cloud-soars-how-cloud-based-supply-chain-management-is-revolutionizing-manufacturing/>

22. The Volkswagen Group on AWS. (2024). *Amazon Web Services*. <https://aws.amazon.com/solutions/case-studies/innovators/volkswagen-group/>

23. Takeda brings clinical data to life for AI. (2024). *Informatica*. <https://www.informatica.com/customer-success-stories/takeda.html>

24. What Walmart's RFID Expansion Means for the Industry. (2024). *RFID Label*. <https://www.rfidlabel.com/what-walmarts-rfid-expansion-means-for-the-industry-rfid-walmart/>

25. Report: Amazon Warehouse Robots Increased by 50% Last Year. (2017). *Industrial Distribution*. <https://www.inddist.com/business-technology/news/13773416/report-amazon-warehouse-robots-increased-by-50-last-year>

26. Automation in Shipping: Maersk Sets Benchmarks in Reefer Monitoring. (2021). *Tata Consultancy Services*. <https://www.tcs.com/what-we-do/industries/travel-and-logistics/case-study/maersk-cloud-iot-platform-automate-reefer-monitoring-system>

27. IoT for Operational Efficiency in the Manufacturing Sector. (2024). *Digi International*. <https://www.digi.com/blog/post/iot-for-operational-efficiency-in-manufacturing>

28. How IoT Is Spawning Better Business Models. (2024). *Consagous*. <https://www.consagous.co/blog/how-iot-is-spawning-better-business-models>

29. Rolls-Royce: Optimising Jet Engine Maintenance with Machine Learning. (2018). *Digital Initiative*. <https://d3.harvard.edu/platform-rcotm/submission/rolls-royce-optimising-jet-engine-maintenance-with-machine-learning/>

30. Powering Better Performance and Customer Experience with Internet of Engines. (2019). *Rolls-Royce*. <https://www.rolls-royce.com/country-sites/sea/our-stories/2019/delivering-better-engine-performance-with-iot.aspx>

31. Rolls-Royce adopts AI software to maximise engine availability. (2018). *Aerospace Manufacturing*. <https://www.aero-mag.com/rolls-royce-adopts-ai-software-to-maximise-engine-availability>

32. How Real-Time Data Keeps Elevators Running. (2016). *RTInsights*. <https://www.rtinsights.com/elevator-maintenance-predictive-machine-learning/>

33. Maersk Line technology saves millions for reefer cargo owners. (2017). *Riviera Maritime Media*. <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/maersk-line-technology-saves-millions-for-reefer-cargo-owners-28074>

34. Maersk – Reinventing the Shipping Industry Using IoT and Blockchain. (2018). *Digital Data Design Institute*. <https://d3.harvard.edu/maersk-reinventing-shipping-industry-using-iot-blockchain/>

35. Michelin keeps tire shipments rolling with help of IoT trackers. (2019). *DC Velocity*. <https://www.dcvelocity.com/articles/30912-michelin-keeps-tire-shipments-rolling-with-help-of-iot-trackers>

36. Blockchain – A New Tool to Cut Costs. (2017). *PwC*. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/financial-services/publications/blockchain.html>

37. Industry 4.0: Capturing Value at Scale in Discrete Manufacturing. (2015). *McKinsey & Company*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/manufacturings-next-act>

38. Optimizing Digital Ecosystems to Create More Value. (2024). *Deloitte*. <https://www2.deloitte.com/global/en/pages/strategy-operations/articles/optimizing-digital-ecosystems.html>
39. The Internet of Things: Powering the Digital Economy. (2020). *Accenture*. <https://www.accenture.com/us-en/insights/internet-of-things/iot-digital-economy>
40. AI in Business and Finance Report. (2021). *OECD*. <https://www.oecd.org/finance/ai-in-business-and-finance.htm>
41. Global Lighthouse Network: Unlocking Sustainability through 4IR. (2022). *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/reports/global-lighthouse-network-unlocking-sustainability-through-4ir/>
42. 2025 Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating Challenges to Implementation. (2025). *Deloitte Insights*. <https://www.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing-industrial-products/2025-smart-manufacturing-survey.html>
43. Janik, S., Milkva, M., Mareček-Kolibiský, M. (2022). Effective Data Utilization in the Context of Industry 4.0 Technology Integration. *Applied Sciences (MDPI)*. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/20/10517>
44. Industry 4.0: Building the Digital Enterprise. (2016). *PwC*. <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf>
45. Meyer, M., Glas, A., EBig, M. (2022). A Delphi Study on the Supply Risk-Mitigating Effect of Additive Manufacturing during SARS-CoV-2. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 28(4), 100791. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2022.100791>
46. Alhabatah, A., Yaqot, M., Menezes, B., Kerbache, L. (2023). Transformative Procurement Trends: Integrating Industry 4.0 Technologies for Enhanced Procurement Processes. *Logistics*, 7(3), 63. <https://doi.org/10.3390/logistics7030063>
47. Imoh, I., Aniekan, E. (2024). A Technical Survey on the Role of Robotics in Conventional Manufacturing Process: An Element of Industry 4.0. *FUPRE Journal of Scientific and Industrial Research*, 8(2), 172-192. https://www.researchgate.net/publication/378310688_A_Technical_Survey_on_The_Role_of_Robotics_in_Conventional_Manufacturing_Process_An_Element_of_Industry_40

Received: 02.11.2025

Accepted: 05.12.2025

Сердюк О. С., Петрова І. П. Оцінка впливу технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності

У статті здійснено комплексну оцінку впливу ключових технологій Індустрії 4.0 на інституційно-економічні чинники господарської діяльності. Обґрунтовано, що цифрові технології трансформують економічні системи не лише через підвищення технологічної ефективності, а й через зміну механізмів координації, структури витрат, логіки формування доданої вартості та моделей взаємодії між економічними агентами. Для аналітичної оцінки виокремлено три базові параметри впливу: трансакційні витрати, ланцюги створення вартості та моделі міжагентної взаємодії, які найбільш повно відображають системний характер інституційних і економічних зрушень.

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні кейс-аналізу реальних бізнес-практик, побудови аналітичної матриці впливу технологій Індустрії 4.0 та розрахунку інтегральних показників ефекту за кожною комбінацією технологій і чинників господарської діяльності. Додатково результати емпіричного аналізу верифіковано шляхом метааналізу міжнародних досліджень і звітів провідних консалтингових компаній та застосування методу Делфі для узагальнення експертних оцінок.

Установлено, що найбільш виражений системний вплив на ланцюги створення вартості чинять робототехніка, 3D-друк, хмарні обчислення та Інтернет речей, забезпечуючи скорочення виробничих циклів, підвищення гнучкості та інтеграцію інформаційних і матеріальних потоків. Водночас технології великих даних і блокчейн демонструють домінуючий ефект у сфері зниження трансакційних витрат і трансформації моделей міжагентної взаємодії, формуючи нові механізми цифрової довіри, прозорості та децентралізованої координації. Доведено, що сукупний ефект упровадження технологій Індустрії 4.0 має комплексний характер і поєднує технологічні, організаційні та інституційні складові підвищення ефективності економічних систем. Отримані результати можуть бути використані для наукового обґрунтування політики цифрової трансформації, стратегій технологічного розвитку підприємств та формування інструментів підвищення їх конкурентоспроможності.

Ключові слова: Індустрія 4.0, цифрові технології, трансакційні витрати, ланцюги створення вартості, моделі міжагентної взаємодії, великі дані (Big Data), блокчейн, робототехніка, хмарні обчислення, Інтернет речей (IoT), цифрова довіра, інтегральна оцінка ефекту.

Serdiuk O. S., Petrova I. P. Assessing the Impact of Industry 4.0 Technologies on Institutional and Economic Determinants of Economic Activity

The article provides a comprehensive assessment of the impact of key Industry 4.0 technologies on the institutional and economic determinants of economic activity. It is substantiated that digital technologies transform economic systems not only by increasing technological efficiency, but also by changing coordination mechanisms, cost structures, value creation logics, and models of interaction among economic agents. For analytical purposes, three core impact parameters are identified: transaction costs, value chains, and models of inter-agent interaction, which most fully reflect the systemic nature of institutional and economic transformations.

The research methodology is based on a combination of case study analysis of real business practices, the construction of an analytical matrix of Industry 4.0 technology impacts, and the calculation of integral effect indicators for each combination of technologies and determinants of economic activity. In addition, the results of the empirical analysis are verified through a meta-analysis of international studies and reports by leading consulting firms, as well as the application of the Delphi method to generalize expert assessments.

It is established that robotics, 3D printing, cloud computing, and the Internet of Things exert the most pronounced systemic impact on value chains by reducing production cycles, increasing flexibility, and integrating information and material flows. At the same time, big data and blockchain technologies demonstrate a dominant effect in reducing transaction costs and transforming models of inter-agent interaction, shaping new mechanisms of digital trust, transparency, and decentralized coordination. It is proven that the overall effect of implementing Industry 4.0 technologies is comprehensive, combining technological, organizational, and institutional components of enhanced efficiency of economic systems. The obtained results can be used to substantiate digital transformation policies, enterprise technology development strategies, and the design of instruments to enhance competitiveness.

Keywords: Industry 4.0, digital technologies, transaction costs, value chains, models of inter-agent interaction, big data, blockchain, robotics, cloud computing, Internet of Things (IoT), digital trust, integral effect assessment.