

УДК 331.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2312-7872.2.2025.6>**Скляренко Олена Вікторівна**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувач кафедри математичних дисциплін та інноваційного проектування
Приватний вищий навчальний заклад
«Європейський університет»
ORCID ID: 0000-0001-6555-1223

Вілянський Андрій Володимирович

аспірант,
Приватний вищий навчальний заклад
«Європейський університет»
ORCID ID: 0000-0002-9655-7334

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ ІНДУСТРІЇ 4.0 НА ІННОВАЦІЙНИЙ РОЗВИТОК ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Анотація. Стаття присвячена моделюванню взаємозв'язку між інвестиціями у новітні технології Індустрії 4.0 та продуктивністю промислових підприємств. Актуальність теми обумовлена необхідністю кращого розуміння механізмів, які визначають вплив інновацій на економічні результати, а також потребою в розробці ефективних політик для стимулювання інноваційного розвитку. Моделювання проведено на основі даних 150 великих промислових компаній ЄС. Для аналізу ми використовуємо модифіковану економетричну CDM-модель, яка оцінює залежність між витратами на дослідження і розробки та їх продуктивністю. Методологія застосування структурної CDM-моделі дозволяє врахувати ключові методологічні аспекти, зокрема, проблеми зі зміщенням вибірки та часу (одночасності). Дана модель включає три етапи оцінювання структурної економетричної моделі: ухвалення рішення про інвестиції в дослідження та розробки (R&D), процес виробництва знань та оцінку економічної ефективності. На першому етапі моделювання виявлено, що на зростання продуктивності промислових підприємств та їх трансформацію найбільший вплив мають технології Індустрії 4.0. Визначено наслідки від впровадження нових технологій на фінансовий, операційний, інноваційний та технологічний розвиток підприємств. На другому етапі дослідження проведено аналіз взаємозв'язку між вкладеннями в технології Індустрії 4.0, патернами інноваційної поведінки та продуктивністю промислових компаній з використанням модифікованої моделі CDM. Застосування цієї моделі допомагає оцінити вплив інвестицій у R&D на інтенсивність інноваційної діяльності та, в підсумку, на продуктивність праці. Результати дослідження підтверджують, що інноваційно активні підприємства мають вищі шанси на зростання продуктивності праці, причому, вплив інноваційної активності варіюється залежно від віку. За результатами дослідження було сформовано п'ять стилізованих фактів (емпіричних закономірностей), які висвітлюють ключові чинники, що впливають на інноваційну активність: позитивний вплив розміру та віку підприємства, значимість конкурентного середовища, важливість кваліфікації працівників і професійного розвитку, роль інвестицій у інформаційні технології та значний вплив інновацій на зростання продуктивності праці. Практична цінність дослідження полягає в наданні обґрунтованих емпіричних даних, які можуть бути використані для формування інноваційної політики, зокрема, у створенні умов для доступу до фінансових ресурсів, підтримки професійного розвитку та стимулювання впровадження новітніх технологій Індустрії 4.0.

Ключові слова: промислові підприємства, Індустрія 4.0, інновації, економетрична модель, інвестиції R&D.

Постановка проблеми. Кожен новий етап розвитку промисловості, який у літературі називають промисловою революцією [1, 2], характеризується зміною насамперед виробничих технологій. Адже, саме завдяки їм відбуваються зміни в операційній моделі та виробничих процесах, організаційній структурі управління компаніями, трансформації соціально-економічної системи, переформування бізнес-моделей, що застосовуються.

Нові технології спричинили глибоку трансформацію промислових компаній, змінивши їхні операційні моделі, бізнес-процеси, організаційний дизайн, бізнес-моделі. Саме тому технології Індустрії 4.0 викликають неабиякий інтерес та зацікавлення серед представників як компаній, так і держав: за прогнозами, застосування таких технологій стане головною рушійною силою для створення нових продуктів/технологій/послуг, що призведе до розширення вже наявних ринків. Експерти стверджують, що нові технології Індустрії 4.0 призведуть до зміни в бізнес-процесах промислових

підприємств, тим самим стимулюватимуть зростання конкурентоспроможності на світових ринках різних секторів економіки та країн, результатом цього стане зміцнення потенціалу національних економік [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні кілька років кількість публікацій, присвячених четвертій промисловій революції та її впливу на промислові підприємства, значно зросла [3–5]. Також зростає кількість публікацій, які присвячені впливу характерних технологій Індустрії 4.0 на трансформацію різних секторів промисловості [4–10].

Аналітики прогнозують, що впровадження таких новітніх технологій забезпечить появу нових робочих місць, дасть змогу істотно змінити умови функціонування бізнесу, а також скоротити й оптимізувати робочі операції за допомогою автоматизації та роботизації виробництва, що можна порівняти з новою промисловою революцією [3].

В Україні, на думку аналітиків, нові технології відкривають перспективи для інтеграції у нові ланцюги створення вартості, заміни звичних моделей галузевих ринків, підвищення конкурентоспроможності на світових ринках, що, в підсумку, допоможе відновити економіку в після військовий час [4]. При цьому, на думку фахівців, має бути нова архітектура, яка полягає у впровадженні нових технологій на всіх етапах життєвого циклу продукту: дизайн і створення прототипу, налагодження та обслуговування виробничої лінії, контроль і оптимізація виробництва, а також використання великих даних, отриманих, наприклад, у результаті зворотного зв'язку від клієнтів і споживачів [5]. Подібна архітектура промислових систем може бути впроваджена поступово, за допомогою цифрової модернізації як наявних, так і існуючих виробничих потужностей. Серед науковців України питанням вивчення залежності на основі моделювання впливу інновацій на продуктивність праці не є поширеним, хоча і зустрічаються деякі роботи [10], які в більшості мають теоретичний характер. Проте, за кордоном взаємозв'язок і взаємовплив інновацій, технологій, продуктивності підприємств є активною областю досліджень уже протягом багатьох років. Серед зарубіжних дослідників, які займалися цими питаннями Loof, H., A. Heshmati, R. Asplund, Hoke J., Roud V. [1,3] та ін.

Мета статті. Метою статті є проведення емпіричного аналізу та моделювання впливу технологій Індустрії 4.0, які є визначальними детермінантами, як на продуктивність промислових компаній, так і на трансформацію їх інноваційного розвитку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо характерні технології Індустрії 4.0 та їх вплив на підвищення продуктивності. У наукових дослідженнях, звітах глобальних інституцій, практиків можуть бути різні погляди щодо характерних технологій (табл. 1), проте вони єдині у своїх висновках: впровадження новітніх технологій Індустрії 4.0 кардинально змінює діяльність промислових компаній.

Таблиця 1 – Технології Індустрії 4.0 в дослідженнях провідних консалтингових компаній

Консалтингова компанія	Технології
McKinsey	1) робототехніка; 2) ПоТ; 3) хмарні технології; 4) 3D друк; 5) доповнена та віртуальна реальність; 6) великі дані та аналітика; 7) вироблення та збереження енергії.
KPMG	1) роботи; 2) ПоТ; 3) хмарні технології; 4) 3D друк; 5) доповнена та віртуальна реальність; 6) великі дані та аналітика; 7) штучний інтелект.
PWC	1) роботи; 2) ПоТ; 3) 3D друк; 4) доповнена та віртуальна реальність; 5) безпілотні пристрої; 6) блокчейн; 7) штучний інтелект
BCG	1) автономні роботи; 2) імітація; 3) горизонтальна та вертикальна інтеграція; 4) ПоТ; 5) кібербезпека; 6) хмарні технології; 7) 3D друк; 8) доповнена реальність; 9) великі дані та аналітика

Джерело: складено авторами на основі звітів консалтингових компаній McKinsey, KPMG, PWC, BCG [6–8]

Згідно з дослідженням Глобального інституту McKinsey [6] прогнозується значний розрив показників за показниками серед компаній, які запровадили технології четвертої промислової революції порівняно з тими, що відстають. Зокрема, у компаніях-маяках, які першими почали впроваджувати технології індустрії 4.0, приріст грошового потоку на 22% є вищим ніж у інших, у компаніях-послідовниках – на 10%. Компанії, які за різних причин не змогли своєчасно відреагувати на сформований технологічний тренд, можуть втратити значну частину переваг та доходів.

Дослідження іншої консалтингової компанії Pricewaterhouse Coopers, проведене на основі опитування 200 представників високотехнологічних компаній з різних галузей з метою виявлення основних чинників інвестування в цифрові технології, дає змогу дійти висновку, що впровадження технологій четвертої промислової революції впливає на підвищення продуктивності, дозволяє

краще реагувати на запити клієнтів, персоніфікувати продукцію, скоротити логістичні витрати. Наприклад, експерти компанії McKinsey&Company на основі аналізу реальних компаній, які впровадили технології Індустрії 4.0, дійшли висновку, що завдяки інноваційним технологіям можна: збільшити обсяг виробництва на 10–200%, продуктивність на 5–160%, рентабельність обладнання на 3–50%, енергоефективність на 2–50%, а також зменшити витрати на забезпечення якості на 5–40%, пришвидшити виробничий цикл на 10–90% та виведення на ринок нових продуктів на 30–90% тощо.

Згідно з дослідженням у роботі [3], інтеграція технологій Індустрії 4.0 допоможе промисловим підприємствам знизити виробничі витрати на 10–30%, логістичні – на 10–30%, витрати на управління якістю – на 10–20%. Крім цього, технології Індустрії 4.0 спрямовані на скорочення часу виведення нової продукції на ринок, підвищення результативності взаємодії з клієнтами, сприяння економії масштабу та ефективнішому використанню ресурсів.

Таким чином, на основі аналізу досліджень впливу технологій Індустрії 4.0 на промислове виробництво можна виділити такі економічні наслідки від їх впровадження: фінансові – підвищення виручки та зниження собівартості; якісні – підвищення рівня кастомізації товарів та послуг, індивідуалізація та зниження обсягів вироблених партій товарів; операційні – підвищення гнучкості та адаптивності, прискорення виробничого циклу, підвищення продуктивності; інноваційного та технологічного розвитку – зниження часу створення прототипів, виведення на ринок нових продуктів і підвищення загального рівня технологічного розвитку.

Отже, на основі вище викладеного за допомогою моделювання необхідно визначити впливові детермінанти, які: 1) позитивно впливають на прийняття рішень щодо інвестицій в інноваційні технології Індустрії 4.0; 2) позитивно впливають на інноваційний розвиток промислових підприємств; 3) сприяють росту ефективності виробництва (що виражена через продуктивність).

Опис даних. Для проведення аналізу та моделювання була використана статистична вибірка з сайту Спільного дослідницького центру Європейської Комісії (JRC, Табло інвестицій), який щорічно з 2004 року надає аналітичні дані для компаній, дослідників, політиків тощо. Табло інвестицій у R&D відстежує та порівнює ефективність провідних інвесторів ЄС з їхніми світовими конкурентами. Початковий набір даних містить інформацію про 1641 інноваційно активні підприємства ЄС в різних галузях економіки. Ми відібрали лише ті, які за міжнародною класифікацією icb3 належать до таких секторів промисловості, як: General Industrials, Industrial Engineering, Industrial Metals & Mining, Industrial Transportation та Mining, а також вважаються великими (кількість працівників більше 250 осіб). Проте, ця підвибірка була не репрезентативною, оскільки за період з 2011 по 2023 рр. кількість підприємств щороку була різною.

Після фільтрування всіх даних ми отримали вибірку з 99 інноваційно активних підприємств, для яких наявні всі показники з 2017 по 2023 рр. Як видно з табл. 2, наведені частки показників компаній у визначених групах (за основними показниками), структурно є стабільними. За цими даними ми відслідковували, щоб структурно вибірка була майже однаковою по кожній групі. Тобто, після отримання набору даних відсотковий розподіл практично співпадає з тим, який був у початковому наборі даних.

Компанії даної вибірки відносяться до таких країн ЄС: Іспанія, Німеччина, Нідерланди, Швеція, Австрія, Італія, Ірландія. За результатами багатьох експертів та науковців, в цих країнах зосереджена найбільша частина промислових підприємств, які є лідерами в Індустрії 4.0.

Як видно з табл.3, статистичний аналіз промислових компаній, які увійшли до вибірки, ми проводили у двох розрізах: 1) за змінною Вік компанії (AgeComp) та 2) Рік створення (year_inc). Вік підприємства визначається як різниця між роками заснування та подачі звітності, і коливається від 8 до 334 (!) років, тобто розмах складає більше 300 років. Фактично, частина компаній за всю свою історію існування пройшли всі чотири промислові революції, а отже, вони мають досвід адаптуватися до нових умов, запровадженню інноваційних технологій.

Моделювання. Для дослідження залежності між капіталовкладеннями в технології Індустрії 4.0, продуктивністю та інноваційним розвитком використана модифікована версія моделі CDM для кожної групи. Класична модель CDM оцінює три групи співвідношень, які поєднують інвестиції в дослідження та розробки, результативність інноваційної діяльності та виробничу продуктивність через відношення обсягу доходів до середньооблікової кількості співробітників. Завдяки вирішенню проблеми ендогенності, вона дозволяє провести комплексний аналіз взаємозв'язку між рішеннями щодо R&D, впровадженням інновацій та зростанням продуктивності.

Концепція побудови та дослідження CDM-моделі має три етапи, які вирішують проблеми зміщення даних, які пов'язані з часом та вибіркою, що забезпечує отримання надійних та достовірних економічних результатів. На рис. 1. наведена концептуальна схема моделювання на основі CDM-моделі.

Таблиця 2 – Частка інноваційно активних підприємств за економічними показниками у період з 2011 р. по 2023 р.

year	Ринкова капіталізація			Інтенсивність інвестицій у R&D		
	mcap < 1000	mcap >= 1000 & mcap < 5000	mcap >= 5000	RD_intensity < 0.4	RD_intensity >= 0.4 & RD_intensity < 1	RD_intensity >= 1
2011	0,506	0,333	0,161	0,471	0,299	0,230
2012	0,459	0,306	0,235	0,482	0,271	0,247
2013	0,375	0,375	0,250	0,477	0,364	0,159
2014	0,374	0,385	0,242	0,440	0,363	0,198
2015	0,415	0,372	0,213	0,436	0,330	0,234
2016	0,337	0,398	0,265	0,429	0,347	0,224
2017	0,300	0,450	0,250	0,430	0,380	0,190
2018	0,357	0,408	0,235	0,429	0,357	0,214
2019	0,360	0,350	0,290	0,390	0,350	0,260
2020	0,426	0,336	0,238	0,451	0,352	0,197
2021	0,359	0,350	0,291	0,436	0,359	0,205
2022	0,426	0,322	0,252	0,435	0,322	0,243
2023	0,375	0,337	0,288	0,394	0,327	0,279
year	Рік заснування компанії			Позиція компанії в рейтингу Табло		
	year_inc < 1910	year_inc з 1910 до 2011 pp	year_inc після 2011	eu_rank < 200	eu_rank >= 200 & eu_rank < 600	eu_rank >= 600
2011	0,33	0,66	0,01	0,22	0,39	0,39
2012	0,34	0,65	0,01	0,22	0,44	0,34
2013	0,32	0,67	0,01	0,19	0,49	0,32
2014	0,31	0,67	0,02	0,18	0,53	0,30
2015	0,30	0,68	0,02	0,17	0,50	0,33
2016	0,30	0,68	0,02	0,20	0,45	0,35
2017	0,28	0,69	0,03	0,18	0,41	0,41
2018	0,29	0,69	0,02	0,18	0,44	0,38
2019	0,29	0,69	0,02	0,19	0,42	0,39
2020	0,29	0,67	0,04	0,17	0,45	0,38
2021	0,29	0,67	0,04	0,18	0,44	0,38
2022	0,29	0,66	0,05	0,17	0,45	0,37
2023	0,32	0,63	0,06	0,20	0,52	0,28

Джерело: розраховано авторами за даними [11]

Таблиця 3 – Описова статистика відібраних промислових підприємств у період 2017–2023 рр. в розрізі «Вік» та «Рік заснування» компанії

Показник	Статистична величина	«Вік компанії»			«Рік заснування» підприємства		
		до 50 років	від 50 до 100	більше 100	до 1910 р	1910–2010 pp	після 2010 р
1	2	3	4	5	6	7	8
netsales_23	min	15,293	221,031	114,620	157,673	58,949	77,241
	mean	7624,591	2806,037	5453,192	5765,398	5977,699	4792,397
	median	2344,522	1967,772	3487,867	3775,497	2054,762	2664,130
	max	72664,665	10387,219	24242,112	24242,112	72664,665	23593,556
mcap_23	min	18,453	106,471	57,643	139,420	15,572	108,246
	mean	5308,240	2575,857	5278,379	5579,825	4145,744	4724,456
	median	1500,366	1150,356	2273,021	2404,841	1256,896	1509,784
	max	40339,341	14550,373	31136,206	31136,206	40339,341	26663,208
capex_23	min	0,517	5,322	6,552	8,298	0,672	3,906
	mean	293,933	153,618	152,626	161,784	257,240	148,472
	median	58,501	74,492	109,715	118,524	64,264	63,764
	max	3419,468	890,545	606,345	606,345	3419,468	734,617

Склярєнко О. В., Вілянський А. В.

Моделювання впливу технологій Індустрії 4.0 на інноваційний розвиток промислових підприємств

Продовження таблиці 3

1	2	3	4	5	6	7	8
emp	min	88	831	677	922	256	163
	mean	36026	9474	20663	21854	27116	19564
	median	9799	6785	14869	15531	8192	9144
	max	519566	37029	97963	97963	519566	102153
rnd_23	min	4,679	5,061	6,774	6,815	4,299	5,304
	mean	78,287	47,992	147,741	156,731	64,481	79,109
	median	25,332	29,063	62,191	70,068	26,015	34,223
	max	634,623	232,280	1784,692	1784,692	634,623	338,049
RD_intensity	min	0,008	0,068	0,067	0,067	0,008	0,149
	mean	1,227	0,644	0,682	0,672	0,846	2,010
	median	0,420	0,494	0,598	0,575	0,464	0,501
	max	20,702	2,564	2,237	2,237	10,969	14,774
profit_23	min	-2435,559	-379,530	-509,780	-509,780	-2441,838	-8,121
	mean	444,621	201,612	382,306	403,913	345,649	392,665
	median	118,042	104,854	200,342	216,977	100,679	145,894
	max	5565,934	1079,002	2088,845	2088,845	5400,108	2195,972
AgeComp	min	7,9	51,4	100,8	114,7	18,9	7,9
	mean	27,7	73,0	155,2	158,7	52,9	14,0
	median	27,0	69,7	145,9	149,4	47,0	14,0
	max	48,8	98,7	333,8	333,8	112,8	17,8
eu_rank	min	62,0	128,6	24,3	24,3	62,0	113,4
	mean	524,8	541,6	384,7	366,8	535,9	513,7
	median	521,6	516,5	329,1	306,3	522,4	481,3
	max	1015,3	993,3	938,5	936,1	1034,5	968,8

Примітка: усі кількісні дані [11] наведені в перерахунку на курс євро станом на кінець 2023 року; netsales_23 – чистий дохід (млн євро); mscar_23 – ринкова капіталізація (млн євро); sarrex_23 – інвестиції в інноваційні технології; emp – кількість працівників (осіб); rnd_23 – витрати на R&D (млн євро), RD_intensity – рівень інтенсивності кап інвестицій на 100 працівників, млн євро (розраховується як відношення $RD_intensity = 100 * rnd_23 / emp$ (млн євро на 100 працівників); AgeComp – вік компанії (роки); profit_23 – операційний прибуток eu_rank – позиція компанії рейтингу Європейського Табло з інвестицій та інновацій.

Джерело: розраховано авторами за даними [11]

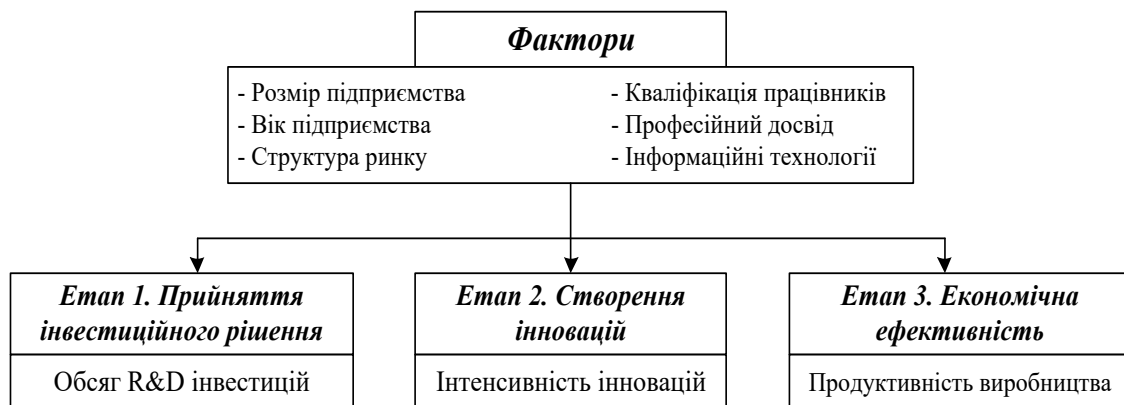


Рисунок 1 – Концептуальна схема моделювання на основі CDM-моделі

Джерело: складено авторами на основі [9]

На першому етапі компанії вирішують, чи інвестувати в R&D та в якому обсязі. Другий етап фокусується на функції генерування нових знань, яка пов'язує інвестиції в науково-дослідні розробки з їхніми кінцевими результатами. В залежності від поставлених завдань та наявних даних, індикаторами результативності можуть бути або обсяг продажів інноваційної продукції, або кількість зареєстрованих патентів, або кількість впроваджених інновацій тощо. На третьому етапі будується розширена виробнича функція Коба-Дугласа для оцінки взаємозв'язку між результатами інновацій та економічною ефективністю.

Більшість економетричних досліджень на основі CDM підходу проводять на мікроданих з Community Innovation Survey (CIS). Ці дослідження мають спільну методологічну основу, але суттєво відрізняються набором пояснюючих змінних та використаними економетричними методами. Деякі дослідження оцінюють економічну ефективність за допомогою показників прибутковості, тоді як інші зосереджуються на продуктивності факторів виробництва, що дозволяє порівнювати різні структурні модифікації CDM-методу. Для досягнення мети дослідження ми модифікували цю модель наступним чином.

Етап 1. На цьому кроці будується модель, яка складається з рівнянь. Перша частина моделі оцінює ймовірність прийняття промисловими підприємствами рішення про інвестиції в новітні технології Індустрії 4.0 та у випадку позитивного рішення – інтенсивність вкладень, обчислена як сума витрат з розрахунку на одного співробітника. Для аналізу використано регресію Хекмана, яка дозволяє не тільки оцінити ймовірність позитивного рішення щодо інвестицій у технології, а й визначити їх інтенсивність. Модель складається з двох частин, перша – модель бінарного вибору, що визначає «інвестувати/не інвестувати», друга – лінійна модель оцінює інтенсивність вкладень у новітні технології. Крім того, використання моделі регресії Хекмана дає змогу враховувати не тільки компанії, які вже інвестують у технології четвертої промислової революції, а й ті, що тільки планують це зробити. Таким чином, у моделі Хекмана є дві латентні змінні, які пояснюють рішення фірм інвестувати в нові технології:

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } y_i^* = x_i \beta_i + \varepsilon_i > \tau \\ 0, & \text{якщо } y_i^* = x_i \beta_i + \varepsilon_i \leq \tau \end{cases}, \quad (1)$$

де y_i – результативна змінна (1 – якщо підприємство приймає рішення інвестувати в нові технології, 0 – для інших); y_i^* – латентна (не результативна) ендегенна змінна, яка відображає схильність компанії до впровадження інновацій (також вона може інтерпретуватись як критерій вибору, наприклад, через результативність від впровадження технологій Індустрії 4.0); x_i – факторні змінні, які пояснюють схильність підприємств до інноваційних технологій; β_i – коефіцієнти моделі; ε_i – залишки моделі.

Друге рівняння моделі Хекмана відображає інтенсивність витрат при виборі варіанта «інвестувати», яка виражена як величина вкладень у нові технології, розрахована на одного співробітника:

$$w_i = \begin{cases} w_i^* = k_i a + u_i, & \text{якщо } y_i = 1 \\ w_i^* = 0, & \text{якщо } y_i = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

де w_i^* – латентна (не результативна) ендегенна змінна, яка оцінює обсяг інвестицій в нові технології (якщо в рівнянні (1) було обрано випадок «не інвестувати», то $w_i^* = 0$); k_i – фактори, які пояснюють залежність інтенсивності капіталовкладень в нові технології (які будуть відібрані далі); a – вектор, який відображає тренд; u_i – залишки.

Етап 2. Друга частина структурної моделі показує залежність інноваційного розвитку (або інноваційної поведінки) промислового підприємства від рівня вкладень у нові технології за допомогою наступної функції:

$$g_i = \bar{w}_i \alpha + h_i \delta + e_i, \quad (3)$$

де g_i – інноваційний розвиток промислового підприємства; $\bar{w}_i$ – середні інвестиції в нові технології у розрахунку на одного співробітника, які були розраховані в першій моделі вибору «інвестувати / не інвестувати»; h_i – факторні змінні, які впливають на інноваційний розвиток (інноваційну поведінку); α та δ – вектори коефіцієнтів моделі; e_i – залишки моделі.

Інноваційний розвиток промислових підприємств, як правило, розглядають через призму відповідних шаблонів інноваційної поведінки, які включають три основні групи чинників: типи інновацій, джерела використаних знань та інформації, витрати компаній на здійснення інноваційної діяльності. Створення, нагромадження та передача знань є важливими характеристиками інноваційної поведінки компаній, і, в зв'язку з цим, для аналізу інноваційного розвитку промислових підприємств ми використали кількість зареєстрованих патентів.

Етап 3. Остання частина моделі відображає, наскільки збільшується ефективність функціонування компанії після інвестицій у технології Індустрії 4.0:

$$\rho_i = \bar{g}_i \mu + \pi_i \lambda + v_i, \quad (4)$$

де ρ_i – ефективність функціонування промислового підприємства (яка виражена через такі показники як ρ_1 – дохід від реалізації інноваційної продукції, ρ_2 – продуктивність праці); π_i – вектор показників компанії (це її обсяг експорту та розмір виражений в кількості працівників); $\bar{g}_i$ – показники інноваційного розвитку, які розраховані на етапі 2; μ та λ – відповідні коефіцієнти моделі; v_i – залишки моделі.

Моделювання взаємозв'язку між вкладеннями компаній у технології Індустрії 4.0, інноваційним розвитком та продуктивністю європейських промислових компаній було проведене для трьох груп компаній: молоді (вік до 50 років), середні (від 50 до 100 років) та зрілі (більше 100 років).

Результати засвідчили, що у двох (молоді та зрілі) із трьох груп є стійкий позитивний взаємозв'язок між капітальними вкладеннями в нові технології Індустрії 4.0, інноваційною результативністю та продуктивністю. Цей взаємозв'язок не підтверджено для промислових підприємств середнього віку: тут спостерігається позитивний взаємозв'язок між інвестиціями в технології Індустрії 4.0 та продуктивністю, та негативний – між вкладеннями в інновації та продуктивністю. У середньому серед усіх підприємств (без групування) витрати на технології Індустрії 4.0 підвищують продуктивність праці з еластичністю 0,21, витрати на інновації – з еластичністю 0,16. Найбільшу значимість для продуктивності має чистий прибуток від продажу нових продуктів компанії, а наявність патентів в організації має менш виражений та не значущий вплив.

Висновки. Проведене дослідження підкреслює вирішальну роль інновацій у стимулюванні зростання продуктивності на рівні промислових підприємств, що підтверджується даними, отриманими в результаті застосування економетричної структурної CDM моделі у різних контекстах. Модель CDM дає цінне розуміння механізмів взаємозв'язку між інвестиціями в R&D, інтенсивністю витрат на технології Індустрії 4.0 та економічні показники, вирішуючи такі проблеми, як зміщення за вибіркою та за часом. Результати дослідження підтверджують, що промислові підприємства, які займаються інноваціями, мають вищу ймовірність до збільшення продуктивності, причому величина цього впливу варіюється залежно від року заснування компанії та R&D інтенсивності.

В результаті проведеного дослідження визначено основні детермінанти взаємозв'язку між інноваціями та продуктивністю. По-перше, розмір та вік компанії позитивно впливають на інновації. Більші та старіші компанії виділяють більше ресурсів на інновації, отримуючи вигоду від ефекту масштабу, кращого доступу до фінансових ресурсів та досвіду, в той час як інтенсивність R&D залишається незмінною. По-друге, досвід та професійний розвиток співробітників сприяють впровадженню інновацій: кваліфіковані працівники та інвестиції в навчання підвищують інноваційну активність промислових підприємств, хоча вплив цих факторів залежить від розміру компанії. По-третє, інвестиції в технології Індустрії 4.0 доповнюють інновації, забезпечуючи гнучкість структур та вдосконалення процесів. По-четверте, інновації значною мірою стимулюють зростання продуктивності: збільшення інноваційної активності на 1% підвищує ймовірність зростання продуктивності в середньому на 23%.

Отримані результати підкреслюють важливість інновацій в економічному розвитку та створюють основу для цілеспрямованої політики як для підприємств, так і для регіонів, секторів тощо. Усунення структурних бар'єрів, покращення доступу до фінансових ресурсів та сприяння науково-дослідницькій співпраці будуть важливими кроками для стимулювання розвитку та впровадження інновацій, зростання продуктивності в різних галузях та регіонах. Наведені емпіричні дані можуть бути використані при розробці та впровадженні стратегій інноваційного розвитку та поглибити розуміння взаємозв'язку між інноваціями та продуктивністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Reisch, George A. (2019) *The Politics of Paradigms*. Thomas S. Kuhn, James B. Conant and the Cold War Struggle for Men's Minds, State University of New York Press, N.Y.
2. Embracing Industry 4.0—and Rediscovering Growth. BCG. URL: <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>.
3. Rojko A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. Vol. 11. No. 5. P. 77–90.
4. Muravitski A. Unbreakable Defenses: Lessons from Ukraine on Building Business Resilience During Wartime. Deloitte. 2023. URL: <https://www.deloitte.com/ce/en/services/risk-advisory/perspectives/lessons-from-ukraine-on-building-business-resilience-during-wartime.html>
5. Чайкіна А. О. Індустрія 4.0: особливості цифрової трансформації України. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2021. Том 32 (71). № 3. С. 24–31.
6. European Commission. (2017, May). *Key lessons from national Industry 4.0 policy initiatives in Europe*. Digital Transformation Monitor. URL: https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Policy%20initiative%20comparison%20v1.pdf
7. What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR? McKinsey & Company. 2022. URL: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir#/>
8. Liu Shi, Shaomeng Li et Xiaolan Fu. The Fourth Industrial Revolution, Technological Innovation and Firm Wages: Firm-level Evidence from OECD Economies, *Revue d'économie industrielle*. 2020. 169 p. URL: <https://doi.org/10.4000/rei.8798>
9. Zhernovyi, D. CDM framework for R&D–innovation–productivity relationship: *Theoretical and empirical perspectives*. *Економіка та суспільство*. Випуск № 68, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-17>

10. Скляренко, О. В., & Гук, П. В. (2024). Аспекти побудови економіко-математичної моделі оцінки економічної доцільності модифікації підприємства. *Економіка і управління*, (2), 19–25.
11. The 2024 EU Industrial R&D Investment Scoreboard. URL: <https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard/2024-eu-industrial-rd-investment-scoreboard>.

REFERENCES

1. Reisch, George A. (2019) *The Politics of Paradigms*. Thomas S. Kuhn, James B. Conant and the Cold War Struggle for Men's Minds, State University of New York Press, N.Y.
2. Embracing Industry 4.0 – and Rediscovering Growth. BCG. Available at: <https://www.bcg.com/capabilities/operations/embracing-industry-4.0-rediscovering-growth.aspx>.
3. Rojko A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. Vol. 11. No. 5. P. 77–90.
4. Muravitski A. Unbreakable Defenses: Lessons from Ukraine on Building Business Resilience During Wartime. Deloitte. 2023. Available at: <https://www.deloitte.com/ce/en/services/risk-advisory/perspectives/lessons-from-ukraine-on-building-business-resilience-during-wartime.html>
5. Chaikina A. O. (2021) *Industriia 4.0: osoblyvosti tsyfrovoi transformatsii Ukrainy* [Industry 4.0: peculiarities of Ukraine's digital transformation] *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Serii: Ekonomika i upravlinnia*. Vol. 32 (71). No 3. P. 24-31. (in Ukrainian)
6. European Commission. (2017, May). *Key lessons from national Industry 4.0 policy initiatives in Europe*. Digital Transformation Monitor. Available at: https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/sites/default/files/DTM_Policy%20initiative%20comparison%20v1.pdf
7. What are Industry 4.0, the Fourth Industrial Revolution, and 4IR? McKinsey & Company. 2022. Available at: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-are-industry-4-0-the-fourth-industrial-revolution-and-4ir#/>
8. Liu Shi, Shaomeng Li et Xiaolan Fu, The Fourth Industrial Revolution, Technological Innovation and Firm Wages: Firm-level Evidence from OECD Economies, *Revue d'économie industrielle*. 2020. 169 p. DOI: <https://doi.org/10.4000/rei.8798>
9. Zhernovyi, D. (2024). CDM framework for R&D–innovation–productivity relationship: Theoretical and empirical perspectives. *Ekonomika ta suspilstvo – Economics and Society*, (68). DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-17>
10. Sklyarenko, O. V., & Huk, P. V. (2024). Aspects of constructing an economic-mathematical model for evaluating the economic feasibility of enterprise modification. *Economics and Management*, (2), 19–25.
11. The 2024 EU Industrial R&D Investment Scoreboard. Available at: <https://iri.jrc.ec.europa.eu/scoreboard/2024-eu-industrial-rd-investment-scoreboard>

Olena Skliarenko, Andrii Vilianskyi

Private Higher Education Establishment “European University”

MODELING THE IMPACT OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES ON THE INNOVATIVE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

Abstract. The article is devoted to modeling the relationship between investments in the latest Industry 4.0 technologies and the productivity of industrial enterprises. The relevance of the topic is driven by the need to better understand the mechanisms that determine the impact of innovation on economic performance, as well as the need to develop effective policies to stimulate innovation. The modeling is based on data from 150 large industrial companies in the EU. For our analysis, we use a modified econometric CDM model that estimates the relationship between R&D expenditures and productivity. The methodology of applying the structural CDM model allows us to take into account key methodological aspects, in particular, problems with sample and time (simultaneity) bias. This model includes three stages of estimation of a structural econometric model: decision-making on R&D investments, knowledge production process, and economic efficiency assessment. At the first stage of modeling, it was found that the growth of industrial enterprises' productivity and their transformation are most influenced by Industry 4.0 technologies. The consequences of the introduction of new technologies on the financial, operational, innovative and technological development of enterprises are determined. The second stage of the study analyzes the relationship between investments in Industry 4.0 technologies, patterns of innovative behavior and productivity of industrial companies using a modified CDM model. The application of this model helps to assess the impact of R&D investments on the intensity of innovation and, ultimately, on labor productivity. The results of the study confirm that innovatively active enterprises have a higher chance of increasing labor productivity, and the impact of innovation activity varies by age. Based on the results of the study, five stylized facts (empirical regularities) were formed that highlight the key factors that influence innovation activity: the positive impact of the size and age of the enterprise, the importance of the competitive environment, the importance of employee qualifications and professional development, the role of investment in information technology, and the significant impact of innovation on labor productivity growth. The practical value of the study lies in the provision of sound empirical data that can be used to formulate innovation policy, in particular in creating conditions for access to financial resources, supporting professional development and stimulating the introduction of the latest Industry 4.0 technologies.

Keywords: industrial enterprises, Industry 4.0, innovations, econometric model, R&D investments.