

**Оксана Миколаївна Гаркушенко,**  
канд. екон. наук, старший науковий співробітник  
Інститут економіки промисловості НАН України  
вул. Марії Капніст, 2, м. Київ, 03057, Україна  
E-mail: [garkushenko.o.n@gmail.com](mailto:garkushenko.o.n@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0002-9153-3763>

## СИСТЕМНО-ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НА СТАЛИЙ РОЗВИТОК<sup>1</sup>

Таке актуальне в сучасному світі явище, як цифровізація, може стати інструментом досягнення цілей сталого розвитку. Проте воно є новим, і його переваги та загрози ще недостатньо вивчені. Частково вирішити цю проблему можливо шляхом створення економіко-математичних моделей оцінки впливу цифровізації на сталий розвиток. Більшість існуючих моделей у даній сфері присвячено визначенню впливу цифровізації на економічні аспекти діяльності країн, а природоохоронні або ігноруються, або представлені дуже приблизно, зі значним абстрагуванням.

Метою статті є розробка та реалізація економіко-математичної моделі, яку в узагальненому вигляді можна використовувати для різних країн світу за умови її певної адаптації та деталізації національних показників. Такий підхід дозволяє врахувати різницю в соціально-економічному становищі країн і рівнях їх цифровізації, що надає можливість дійти більш обґрунтованих висновків за результатами розрахунків.

Запропоновану модель побудовано на основі методу системної динаміки, що дає змогу врахувати траєкторію попереднього розвитку, і реалізовано на прикладі України. За її допомогою здійснено два обчислювальних експерименти: інерційний (прогноз на 5 років за умови збереження всіх поточних закономірностей цифровізації економіки країни) та сценарій, за якого змінюються патерни інвестування в цифровий капітал України (на патерни європейських країн – Іспанії та Угорщини) при збереженні решти умов незмінними.

Визначено, що цифрові техніка та технології у складі капіталу природоохоронного призначення промисловості України так само, як і нецифрові, мають вкрай незначний вплив на скорочення енергоспоживання та не сприяють суттєвому зниженню обсягів викидів забруднюючих речовин у повітря. За умови збереження поточної ситуації (інерційний сценарій) викиди забруднюючих речовин в повітря у 2024 р. можуть навіть зрости на 0,8% порівняно з 2019 р.

У процесі експерименту щодо заміни патернів інвестування в Україні (на патерни Угорщини та Іспанії) встановлено, що попри зміну характеру та (у випадку Угорщини) напряму інвестування в цифрові техніку та технології, що суттєво позначилося на їх обсязі (як у виробничий, так і у природоохоронний капітал), в Україні при збереженні решти умов функціонування промисловості показники доданої вартості, енергоспоживання, захворюваності трудящих та обсяг забруднення залишаються практично на такому самому рівні, як і до заміни. Тому «сліпе» копіювання практики цифровізації інших країн при збереженні

<sup>1</sup> Стаття підготовлена в рамках виконання проекту «Вплив цифровізації на забезпечення сталого розвитку в умовах глобальної нестабільності» (номер держреєстрації 0120U101825) цільової програми наукових досліджень НАН України «Соціально-економічний розвиток України в умовах глобальної нестабільності» (КПКВК 6541030) та планових досліджень ІЕП НАН України (підтема «в») «Форсайтінг податково-бюджетного, грошово-кредитного та екологічного регулювання розвитку національної промисловості» бюджетної теми «Довгострокові фактори і тенденції розвитку національної промисловості в умовах четвертої промислової революції» (шифр теми III-04-19, державний реєстраційний номер роботи 0119U001473)).

незмінними решти умов, без урахування особливостей національного інституційного середовища, ступеня розвитку науки і техніки є недоцільним, оскільки не приводить до поліпшення ситуації в Україні.

Доведено, що цифровізація сама по собі не здатна подолати сьогоденні несприятливі тенденції розвитку України. Необхідно здійснювати фундаментальні зміни у розвитку реального сектору економіки на інноваційній основі, обсягах і структурі інвестицій, схильності економічних суб'єктів до інвестицій, яка наразі перебуває на низькому рівні, а також формувати цілісну промислово-цифрову екосистему, аналогічну європейським, але з урахуванням неоднорідності європейських економік, їх досвіду, особливостей сучасного стану і динаміки розвитку техніко-технологічного й інституційного середовища України.

*Ключові слова:* цифровізація, сталий розвиток, економіко-математична модель, інвестиції.

*JEL:* C61, O14, Q01

З початку 1970-х років і до сьогодні завдяки зусиллям організацій на кшталт Римського клубу світом поширюється ідея про необхідність забезпечення такого розвитку суспільств, за якого відбувається задоволення сучасних потреб без шкоди для здатності майбутніх поколінь задовольняти їх потреби<sup>1</sup> (United Nations General Assembly, 1987, p. 16). Тобто метою розвитку суспільств є досягнення сталого розвитку, який інтегрує в собі одночасний економічний, соціальний розвиток, боротьбу з бідністю, неписьменністю, забрудненням довкілля. Хоча слід відзначити, що попри таке широке трактування змісту поняття «сталий розвиток», на практиці переважно йдеться про спроби досягти такого економічного розвитку, за якого щонайменше розвиватиметься економіка та не погіршуватиметься стан довкілля (Emas, 2015).

Інструментом досягнення сталого розвитку може бути використання на практиці цифрових техніки та технологій. Цифровізація економіки – ще один світовий тренд, що набув актуальності приблизно за останні десять років. Втім, як і будь-яке нове явище, він пов'язаний із низкою невизначеностей щодо того, який вплив такі техніка та технології можуть мати на досягнення суспільством стану сталого розвитку загалом та забруднення довкілля зокрема (Гаркушенко, Заніздра, 2020). Попередні оцінки щодо можливого впливу циф-

ровізації економіки на досягнення сталого розвитку можна виконати із застосуванням економіко-математичних моделей сталого розвитку, деякі з яких проаналізовано нижче.

#### **Короткий огляд відомих моделей сталого розвитку**

Переважає більшість робіт, у яких досліджується роль інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) та цифровізації в сучасному світі, сконцентровано на економічних аспектах впливу цих технологій. Детальний аналіз найбільш відомих і цитованих із них, розпочинаючи з досліджень Р. Солоу (Solow, 1956; Solow, 1957) і закінчуючи моделлю китайської медіа-групи Caixin Media Company Ltd. 2016 р. (Herrero, Xu, 2018), наведено в статті (Гаркушенко, Князев, 2019). Характерною особливістю більшості розглянутих моделей є те, що вплив ІКТ на економічний розвиток у них визначається по групі високорозвинутих країн (як у (Jorgenson, Ho, Stiroh, 2003)).

Проте, як доведено, наприклад, фахівцями ІЕП НАН України в рамках наукових проєктів 2018-2019 рр.<sup>2</sup>, а також у роботі (Audi, Amjal, 2019), вплив ІКТ, цифрових техніки та технологій на країни з різним рівнем соціально-економічного роз-

<sup>1</sup> «...it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs».

<sup>2</sup> У рамках виконання наукових проєктів «Трансформаційний потенціал цифровізації економіки України» (2018 р., номер держреєстрації 0118U002109) та «Технологічні розриви та шляхи їх подолання в умовах глобальної нестабільності» (2019 р., номер держреєстрації 0119U001660»).

витку й інституційним устроєм може значно різнитися.

Робота останніх становить інтерес стосовно того, за яким принципом її автори здійснювали групування країн. Для аналізу впливу ІКТ вони використовують виробничу функцію Кобба-Дугласа, але не традиційні дво- або трифакторні її модифікації, та створили власну (Audi, Amjal, 2019, р. 8-11):

$$ED = f(ICT_{it}, MES_{it}, TRADE_{it}, PHCAP_{it}),$$

де  $ED$  – темпи зростання ВВП на душу населення;  $ICT$  – експорт та імпорт ІКТ-товарів, % усього експорту та імпорту товарів;  $MES$  – дефлятор ВВП для вимірювання макроекономічної стабільності;  $TRADE$  – відсоток зовнішньоторговельних операцій за виключенням експорту та імпорту ІКТ;  $PHCAP$  – інвестиції в капітал, % ВВП;  $i$  – відібрані країни (у сукупності – 87 розвинутих і тих, що розвиваються);  $t$  – змінна часу (рік, з 2000 по 2017 р.).

За допомогою економетричного аналізу цю функцію було реалізовано для розвинутих країн і тих, що розвиваються, відповідно (на думку М. Audi та А. Amjal, до них, увійшла і Україна).

У результаті ці автори по вибірці з усіх досліджуваних країн визначили, що економічний розвиток значною мірою корелюється з досягненнями в ІКТ-секторі. Втім, розвинуті країни виграють в економічному сенсі більше від розвитку цього сектору, ніж ті, що розвиваються. А в останніх, де все ще існує велика залежність від старих технологій виробництва, ІКТ мають незначний вплив на економічний розвиток.

Однак модель М. Audi та А. Amjal має такі недоліки:

сумнівним є обраний авторами підхід до розподілу країн за рівнем економічного розвитку. Так, до групи країн, що розвиваються, увійшли країни як з низьким рівнем доходів на душу населення, так і з високим; є країни, основу економіки яких становить експлуатація обмежених природних ресурсів, а також ті, доходи яких форму-

ються переважно за рахунок високотехнологічного експорту;

у самій виробничій функції не враховано швидкі зміни, що можуть відбуватися в секторі ІКТ, та взаємний вплив виокремлених у функції факторів один на одного з часом;

також сумнівним є введення у виробничу функцію в явному вигляді дефлятора ВВП. Більш логічним було би використати всі показники, виражені в грошовому вимірі, у порівнянних цінах, а за відсутності такої можливості – здійснити нормалізацію.

У роботі (Belkhir, Elmeligi, 2018) здійснено спробу моделювання й оцінки впливу цифрового обладнання та сектору ІКТ на глобальний екологічний відбиток, а також прогноз цього впливу до 2040 р.

На основі видів і кількості цифрового обладнання у 2009(2010)-2016 рр.<sup>1</sup>, а також темпів його приросту в аналізованій період автори розраховали кількість цифрового обладнання за номенклатурою у 2017-2020 рр. у планетарному масштабі. Виходячи з впливу на довкілля цифрового обладнання, виробленого у 2009-2016 рр., здійснено прогноз екологічних наслідків виробництва та використання розрахованої кількості цифрового обладнання на 2017-2020 рр. та навіть до 2040 р.

Фактично L. Belkhir та A. Elmeligi згідно з наявними статистичними даними визначили тренд, на основі якого потім здійснювали інші прогнози. При такому підході не враховується ані розвиток самих цифрових техніки та технологій (наприклад, мініатюризація, що веде до скорочення споживання природних ресурсів на одиницю виробу; можлива зміна асортименту та структури цифрового обладнання), ані природоохоронні вимоги, які висуває міжнародна спільнота та національні уряди як до сектору ІКТ, так і до його продукції. Тому розроблені прогнози є недостатньо обґрунтованими, їх можна виконувати на дуже обмежений проміжок часу,

<sup>1</sup> Статистичні дані щодо окремих видів обладнання проаналізовано з 2009 р., інших – із 2010 р.

коли технології та вимоги щодо охорони довкілля залишаються відносно незмінними.

Крім того, як зазначено вище, різні країни світу мають різний рівень економічного розвитку, що позначається на якості та кількості цифрових техніки та технологій, їх впливу на довкілля. За цих умов моделі, створені в розрахунку на весь світ, є дуже грубими.

Розглянуті моделі побудовано як низку окремих рівнянь. Втім, реальний світ, реальні економічні процеси є сукупністю взаємопов'язаних та взаємозалежних явищ. При цьому ситуація в поточному році є наслідком сукупності процесів та явищ, що мали місце впродовж тривалого періоду до нього. Тобто існує «залежність від попереднього розвитку» (*path dependence*) (Нуреев, Латов, 2007).

Частково врахувати особливості реального світу та розвитку суспільств можливо з використанням методу системної динаміки, розробленого Дж. Форрестером. Зокрема, він використовувався Римським клубом при розробці перших концепцій сталого розвитку (Форрестер, 1971).

Щодо визначення впливу ІКТ та цифровізації на сталий розвиток, то у 2002 р. групою фахівців із чотирьох науководослідних установ Швеції та Швейцарії для Європейської Комісії було розроблено модель впливу ІКТ на екологічну стійкість із застосуванням методу системної динаміки.

Зазначена модель розроблялася для макrorівня – всього ЄС (15 країн, що були членами цього об'єднання на той час). За її допомогою оцінювався вплив ІКТ на такі параметри, як загальне енергоспоживання, частка відновлюваної енергетики, викиди парникових газів, обсяг муніципальних відходів, що залишилися без переробки, за кількома сценаріями розвитку. Тобто, незважаючи на те що автори моделі намагалися визначити вплив ІКТ на сталий розвиток, вони обмежувалися лише екологічною його складовою.

Моделювання здійснювалося для періоду 2000–2020 рр. виходячи з припущень про темпи зростання ВВП ЄС, розширення об'єднання (до 35 країн-членів), зростання кількості населення, офісних працівників, скорочення міграції. Переважну більшість даних для моделі було одержано експертним шляхом.

Переоцінка результатів цієї моделі у 2015 р. засвідчила, що жоден із трьох розглянутих сценаріїв розвитку не виявився реалістичним, а сама вона потребує вдосконалення (Achachlouei, Hilty, 2015).

Недоліки даної моделі полягають у тому, що в ній розглянуто ЄС загалом. І хоча на час створення моделі до об'єднання входило лише 15 країн, втім навіть їх соціально-економічний розвиток та чинники, під впливом яких формувалися окремі його елементи, могли суттєво розрізнятися. Крім того, коли в моделі використовуються експертні оцінки, є вірогідність того, що на них вплинуть суб'єктивні чинники, особисті вподобання та прагнення окремих фахівців. Відповідно, це також може позначитися на результатах моделювання.

З урахуванням наведених міркувань про недоліки та переваги відомих моделей оцінки впливу ІКТ і цифрових технологій на економіку та сталий розвиток *метою* статті є розробка та реалізація економіко-математичної моделі, яку в узагальненому вигляді можна використовувати для інших країн світу та за потреби деталізувати на основі відповідної статистичної інформації. Такий підхід дозволяє врахувати різницю в соціально-економічному (а не лише економічному) становищі країн та рівнях цифровізації, що дає змогу дійти більш обґрунтованих висновків за результатами розрахунків. Модель пропонується будувати на основі методу системної динаміки з урахуванням траєкторії попереднього розвитку країни. За допомогою цієї моделі можна буде визначити, яким чином інвестиції в цифрові техніку та технології, використувані у промисловості («рушійній силі» економіки та виду діяльності, що є найбільшим забруднювачем довкілля) позначатимуться на рівні енергоспоживання, обся-

гах викидів забруднюючих речовин і рівні захворюваності населення. Таким чином, на відміну від системно-динамічної моделі 2002 р. для ЄС, у цій моделі буде враховано щонайменше чотири, а не одна мета сталого розвитку.

### Постановка моделі в загальному вигляді

Економіко-математичну модель (як і наведені вище) розроблено в рамках неокласичної економічної теорії з урахуванням екологічного чинника. У ній передбачається існування деякої замкнутої системи закритого типу, тобто використовуються тільки ті ресурси, які в ній закладені із самого початку, а екзогенні чинники, що можуть впливати на неї, у розрахунок не беруться.

У моделі вся промисловість розглядається як єдиний блок, робота якого і реакція на зовнішні подразники є однаковими. Дж. Форрестер зазначає, що при динамічному моделюванні особиста увага приділяється загальній картині чинників, які визначають успіх промисловості. Важливими показниками є ті, що належать до галузі загалом, а не ті, що є унікальними (Форрестер, 1971, с. 293).

Центральною ланкою моделі виступає виробнича функція. Пропонується використовувати виробничу функцію Кобба-Дугласа з трьома факторами та модифікацією Р. Солоу (Solow, 1956, р. 85), що враховує технологічні зміни. У даному випадку під такими змінами в першу чергу мається на увазі розвиток цифрових техніки та технологій. Також традиційний фактор «земля» у функції замінено на «енергоспоживання», оскільки енергія є важливим елементом виробничих процесів у промисловості та основна її частка досі виробляється з невідновлюваних природних ресурсів.

$$Y = AK_M^{\alpha_1} L^{\alpha_2} N^{\alpha_3} e^{\gamma t}, \quad (1)$$

де  $Y$  – додана вартість, що утворюється у промисловості,  $Y > 0$ ;  $A$  – технологічна змінна;  $K_M$  – капітал (необоротні активи) виробничого призначення;  $L$  – час, відпрацьований зайнятим у промисловості населенням;  $N$  – енергоспоживання;

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  – коефіцієнти еластичності капіталу виробничого призначення, праці та природних ресурсів;  $e$  – константа,  $e = 2,71828182845904$ ;  $\gamma$  – коефіцієнт еластичності нейтрального НТП;  $t$  – змінна часу (рік).

У формулі (1) і наступних з метою спрощення позначка  $t$  поряд зі змінними не вказана за винятком випадків, коли це необхідно для розуміння формули.

Результуючим показником у формулі (1) обрано додану вартість, оскільки, наприклад, на відміну від обсягів реалізованої продукції, мінімізується можливість подвійного рахунку. Дохід від реалізації та прибуток не обрано, тому що вони можуть залежати від ринкової кон'юнктури та податкової культури, схильності до податкового планування як керівництва окремих промислових підприємств, так і суспільства загалом.

У той же час показник доданої вартості опосередковано свідчить про затребуваність і науково-технологічний рівень промислової продукції.

За аналогією з моделлю Солоу в цій моделі здійснено припущення про те, що дохід від виробництва продукції промисловістю розподіляється за двома напрямками: споживання ( $C$ ) та інвестиції. У рамках даної статті споживання не аналізуватиметься. Щодо інвестицій, то їх обсяг у моделі описується як

$$I(t) = \rho Y(t), \quad (2)$$

де  $I$  – валові інвестиції промисловості;  $\rho$  – частка доходу від доданої вартості, створеної у промисловості, що припадає на валові інвестиції.

У свою чергу, інвестиції можуть розподілятися за двома напрямками: у капітал виробничого та природоохоронного призначення:

$$I = I_M + I_E, \quad (3)$$

де  $I_M$  – інвестиції в капітал виробничого призначення;  $I_E$  – інвестиції в капітал природоохоронного призначення.

Можна припустити, що залежно від соціально-економічного розвитку країни приділятимуть різний ступінь уваги питан-

ням охорони довкілля. Відповідно, уже на етапі розподілення інвестицій на виробничі та природоохоронні це можна відобразити шляхом зміни формули (3) таким чином:

$$\begin{cases} I_M = bI, \\ I_E = (1-b)I. \end{cases} \quad (3.1)$$

де  $b$  – частка інвестицій у капітал природоохоронного призначення,  $0 \leq b \leq 1$ .

Якщо у формулі (3.1)  $b$  дорівнює 1, то можна вже на цьому етапі стверджувати, що в країні щонайменше в конкретному році охороні довкілля не приділяється уваги.

Інвестиції як у капітал природоохоронного призначення, так і у виробничий капітал являють собою суму інвестицій у цифровий та нецифровий капітал:

$$\begin{cases} I_{M1} = (1-c(t))I_M, \\ I_{M2} = c(t)I_M, \\ c(t) = f(t). \end{cases} \quad (4.1)$$

де  $I_{M1}$  – інвестиції у нецифровий капітал виробничого призначення;  $I_{M2}$  – інвестиції у цифровий капітал виробничого призначення<sup>1</sup>;  $c(t)$  – функція, що відображає зміну частки цифрового капіталу з часом у структурі капіталу виробничого призначення,  $0 \leq c < 1$ .

$$\begin{cases} I_{E1} = (1-d(t))I_E, \\ I_{E2} = d(t)I_E, \\ d(t) = f(t). \end{cases} \quad (4.2)$$

де  $I_{E1}$  – інвестиції у нецифровий капітал природоохоронного призначення;  $I_{E2}$  – інвестиції у цифровий капітал природоохоронного призначення;  $d(t)$  – функція, що відображає зміну частки цифрового капіталу з часом у структурі капіталу природоохоронного призначення,  $0 \leq d < 1$ .

<sup>1</sup> Індеси 1 для нецифрових інвестицій, капіталу тощо та 2 – для цифрових інвестицій, капіталу тощо поряд з індексами, що належать до виробництва ( $M$  – *manufacturing*) та охорони довкілля ( $E$  – *environment*), обрано для спрощення запису та сприйняття формул виходячи з ідеї про те, що нецифровий капітал з'явився історично раніше цифрового.

Для значень функцій  $c(t)$  та  $d(t)$  задано умови  $0 \leq c < 1$  та  $0 \leq d < 1$ , тому що можуть виникнути ситуації, коли в країні, наприклад, через її бідність, відмовляються від інвестицій у цифровий капітал виробничого та природоохоронного призначення. Втім, навіть за таких умов є вірогідність існування промисловості (щонайменше тих її видів, які задовольняють базові потреби населення, необхідні для його виживання) і залишатиметься потреба в інвестиціях у капітал виробничого призначення. У той же час якщо значення коефіцієнта  $b$  з формули (3.1) дорівнюватиме 1 (тобто всі інвестиції в країні направляються в капітал виробничого призначення), то немає необхідності у формулі (4.2).

Вартість капіталу виробничого та природоохоронного призначення в кожному році можна представити як суму вартості цифрового та нецифрового капіталу відповідної спрямованості:

$$K_M = K_{M1} + K_{M2}, \quad (5.1)$$

де  $K_M$  – капітал виробничого призначення;  $K_{M1}$  – нецифровий капітал виробничого призначення;  $K_{M2}$  – цифровий капітал виробничого призначення.

$$K_E = K_{E1} + K_{E2}, \quad (5.2)$$

де  $K_E$  – капітал природоохоронного призначення;  $K_{E1}$  – нецифровий капітал природоохоронного призначення;  $K_{E2}$  – цифровий капітал природоохоронного призначення.

Капіталу (як виробничому, так і природоохоронного призначення) притаманні властивості, які не можна описати звичайним сумуванням. Так, основні фонди зазвичай вводяться в експлуатацію не одразу, а з деякою затримкою, викликаною необхідністю здійснити їх монтаж, налагодження, освоєння, перевірку тощо. Крім того, капітал зношується та вибуває з експлуатації через інші, ніж знос, причини (продаж, крадіжка, навмисне псування тощо). Тому в конкретному році вартість капіталу пропонується розраховувати за формулами (6.1-6.4).

Нецифровий капітал виробничого призначення розраховується як

$$K_{M_1}(t) = K_{M_1}(t-1) - O_{M_1}(t) + I_{M_1}(t-1), \quad (6.1)$$

де  $t-1$  – рік, що передує року  $t$ ;  $O_{M_1}(t)$  – вибуття нецифрового капіталу виробничого призначення в році  $t$ .

Вартість цифрового капіталу виробничого призначення розраховується як

$$K_{M_2}(t) = K_{M_2}(t-1) - O_{M_2}(t) + I_{M_2}(t-1), \quad (6.2)$$

де  $O_{M_2}(t)$  – вибуття цифрового капіталу виробничого призначення в році  $t$ .

Вартість капіталу природоохоронного призначення в році  $t$  розраховується в такий спосіб:

$$K_{E_1}(t) = K_{E_1}(t-1) - O_{E_1}(t) + I_{E_1}(t-1), \quad (6.3)$$

де  $O_{E_1}(t)$  – вибуття нецифрового капіталу природоохоронного призначення в році  $t$ .

$$K_{E_2}(t) = K_{E_2}(t-1) - O_{E_2}(t) + I_{E_2}(t-1), \quad (6.4)$$

де  $O_{E_2}(t)$  – вибуття цифрового капіталу природоохоронного призначення в році  $t$ .

У формулах (6.1-6.4) інвестиції введено за рік  $t-1$  виходячи з припущення про те, що на їх освоєння потрібен 1 рік.

Вибуття капіталу розраховується за такими формулами:

$$O_{M_1}(t) = \eta_1 K_{M_1}(t-1) + \Theta_{M_1}, \quad (7.1)$$

де  $\eta_1$  – норма амортизації нецифрового капіталу виробничого призначення;  $\Theta_{M_1}$  – коефіцієнт, що відображає вартість нецифрового капіталу виробничого призначення, який вибув з експлуатації через відмінні від зносу причини;

$$O_{M_2}(t) = \eta_2 K_{M_2}(t-1) + \Theta_{M_2}, \quad (7.2)$$

де  $\eta_2$  – норма амортизації цифрового капіталу виробничого призначення;  $\Theta_{M_2}$  – коефіцієнт, що відображає вартість цифрового капіталу виробничого призначення, який вибув з експлуатації через відмінні від зносу причини;

$$O_{E_1}(t) = \mu_1 K_{E_1}(t-1) + \Theta_{E_1}, \quad (7.3)$$

де  $\mu_1$  – норма амортизації нецифрового капіталу природоохоронного призначення;  $\Theta_{E_1}$  – коефіцієнт, що відображає вартість нецифрового капіталу природоохоронного призначення, що вибув з експлуатації через відмінні від зносу причини;

$$O_{E_2}(t) = \mu_2 K_{E_2}(t-1) + \Theta_{E_2}, \quad (7.4)$$

де  $\mu_2$  – норма амортизації цифрового капіталу природоохоронного призначення;  $\Theta_{E_2}$  – коефіцієнт, що відображає вартість цифрового капіталу природоохоронного призначення, який вибув з експлуатації через відмінні від зносу причини.

Праця (точніше, час, відпрацьований зайнятим у промисловості населенням) є ще одним фактором у виробничій функції. Він описується в такий спосіб:

$$L(t) = L(t-1) - \frac{pd}{100} L(t-1) - S(t-1) + \chi, \quad (8)$$

де  $pd$  – частка смертельних випадків у промисловості від загальної кількості зайнятих у промисловості, %;  $S$  – втрати робочого часу через захворюваність;  $\chi$  – коефіцієнт, що відображає зміну у відпрацьованому часі через інші, ніж захворюваність і смерть, причини.

Втрати робочого часу через захворюваність визначаються як

$$S(t) = \frac{S\_num(t) \cdot S\_long}{360} \cdot S\_wh, \quad (9)$$

де  $S\_num(t)$  – кількість зайнятих, що захворіли у році  $t$ ;  $S\_long$  – коефіцієнт, що відображає середню тривалість захворювання;  $S\_wh$  – коефіцієнт, що відображає середню тривалість робочого дня у промисловості.

У свою чергу, кількість зайнятих, які захворіли в конкретному році, залежить від рівня забруднення довкілля:

$$S\_num(t) = f(P(t)), \quad (10)$$

де  $P(t)$  – обсяг забруднення довкілля в році  $t$ .

Якщо припустити, що вартість капіталу перебуває у прямій залежності від інтенсивності його використання (тобто підприємства працюють на повну потужність, основний капітал не простоює), то в такому разі рівень забруднення довкілля можна описати як

$$P = \Xi K_{M_1}^{\tau_1} K_{M_2}^{\tau_2} K_{E_1}^{\tau_3} K_{E_2}^{\tau_4}, \quad (11)$$

де  $\Xi$  – масштабний коефіцієнт;  $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4$  – показники ступеня, що вказують

на інтенсивність використання виду капіталу.

Останнім, але не за значимістю, фактором виробничої функції є енергоспоживання. Енергія використовується як у виробничих процесах, так і для підтримки функціонування капіталу природоохоронного призначення та підтримки в належному стані основних фондів, безпосередньо не задіяних у виробництві (кондиціонування приміщень, їх освітлення тощо). Тобто логічно припустити, що енергоспоживання є функцією, яка визначається наявністю та масштабами використання основних фондів промислового підприємства (виробничих, природоохоронних, цифрових і нецифрових). Це відображено такою формулою:

$$N = \Delta K_{M1}^{\lambda 1} K_{M2}^{\lambda 2} K_{E1}^{\lambda 3} K_{E2}^{\lambda 4}, \quad (12)$$

де  $\Delta$  – масштабний коефіцієнт;  $\lambda 1, \lambda 2, \lambda 3, \lambda 4$  – показники ступеня, що вказують на інтенсивність використання виду капіталу.

*Реалізація економіко-математичної моделі впливу цифровізації на забезпечення сталого розвитку (на прикладі України)*

Для реалізації економіко-математичної моделі впливу цифровізації на забезпечення сталого розвитку (на прикладі України) використано статистичну інформацію, яку формує та представляє на офіційному сайті (у тому числі в електронних версіях офіційних друкованих видань) Державна служба статистики України (Державна служба статистики України, 2020).

Проаналізовано період 2009-2019 рр. З урахуванням обставин розвитку України протягом цих років нижче буде надано деякі пояснення щодо формування початкової бази статистичної інформації.

Оскільки основною рушійною силою розвитку економіки є промисловість, при формуванні моделі для України зібрано інформацію, що відноситься до промисловості (сектори В, С, D та E за Класифікатором видів економічної діяльності), але не за всіма змінними моделі в Україні збирається статистична інформація. У зв'язку з цим частину даних розраховано виходячи з

припущення про те, що вони розподіляються пропорційно до інших змінних (наприклад, інвестиції природоохоронного призначення у промисловості розподіляються в такому самому відношенні до загальної суми інвестицій, як і викиди промисловістю забруднюючих речовин відносяться до загального обсягу викидів).

Методика збору деяких даних, що стосуються забруднення та цифрових техніки і технологій в Україні та світі загалом, є ще недосконалою, що суттєво ускладнює процес моделювання. Крім того, за аналізований у моделі період (2009-2019 рр.) в Україні через збройний конфлікт немає статистичних відомостей щодо тимчасово окупованої території країни (АР Крим, м. Севастополь, частина Донецької та Луганської областей).

Державною службою статистики України здійснюються заходи щодо надання статистичної інформації до 2014 р. у порівнянному з пізнішими роками вигляді. Але це зроблено не за всіма показниками, потрібними для даної моделі, а якщо вони і є, то максимум за період з 2013 по 2019 р. З урахуванням цього наявні статистичні дані до 2014 р. для порівнянності скориговано шляхом розрахунку коефіцієнтів та їх застосування до даних, що стосуються не охопленого збройним конфліктом періоду. Однак це коригування може бути досить грубим та позначитися на точності результатів моделювання.

При моделюванні як показник «обсяг забруднення» обрано тільки викиди забруднюючих речовин стаціонарними джерелами, оскільки статистична інформація про викиди пересувними джерелами в різні роки враховувала різні види транспорту.

Статистичну інформацію про обсяги викидів стаціонарними джерелами за 2009-2013 рр. скориговано для порівнянності, оскільки дані за 2014-2018 рр. Державною службою статистики України наведено без урахування тимчасово окупованої території АР Крим, м. Севастополя і частини Донецької та Луганської областей. Крім того, статистичну інформацію про викиди за-



бруднюючих речовин стаціонарними джерелами за видами економічної діяльності (зокрема викиди промисловістю) Державна служба статистики почала надавати з 2017 р. До цього вони зазначалися лише за видами забруднюючих речовин та/або за регіонами України.

У виробничій функції як параметр « $N$  – енергоспоживання» розглядається енергоспоживання, що отримуються з невідновлюваних ресурсів (вугілля, природний газ тощо), тис. т нафтового еквіваленту (н.е.). Це обумовлено такими причинами: з часів Першої промислової революції енергія була і залишається важливим джерелом розвитку промисловості; в Україні основним джерелом постачання енергії виступають невідновлювані ресурси, а частка постачання енергії від відновлювальних джерел за даними Державної служби статистики не перевищує 5%.

Щодо визначення норм амортизації капіталу (цифрового, нецифрового, природоохоронного та виробничого призначення) в Україні, то слід зазначити таке.

Ст. 138 п. 3, пп. 3 Податкового кодексу України (ПКУ) (Верховна Рада України, 2020) встановлено мінімально допустимі строки амортизації основних засобів та інших необоротних активів. На основі цих даних можна розрахувати приблизну<sup>1</sup> норму амортизації різних видів активів. Також Державна служба статистики України надає інформацію про капітальні інвестиції за видами активів. Якщо припустити, що: розподілення сум капітальних інвестицій за видами активів відповідає розподіленню вартості основних засобів і нематеріальних активів на підприємствах; розподілення основних засобів і нематеріальних активів у промисловості відповідає їх розподіленню в загальній сумі капітальних інвестицій, то коефіцієнти, що відображають норми амортизації в моделі, можна розрахува-

<sup>1</sup> Оскільки законодавство України передбачає використання різних методів розрахунку амортизації, включно з прискореною амортизацією та виробничим методом нарахування амортизації.

ти як суму часток інвестицій у групи основних засобів і нематеріальних активів, помножених на норму їх амортизації.

У результаті такого розрахунку для моделі визначено, що норма амортизації нецифрових основних фондів та нематеріальних активів виробничого призначення ( $\eta_1$  у формулі (7.1)) становить 6,1%, або 0,061.

Для визначення норми амортизації нецифрових основних фондів та нематеріальних активів природоохоронного призначення ( $\mu_1$  у формулі (7.3)) зроблено припущення, що всі ці фонди складаються з інженерних споруд і нежитлових будинків, машин, обладнання та інвентаря й інших основних фондів. Відповідно розраховано усереднену норму амортизації для основних фондів і нематеріальних активів цього напрямку, яка склала 13,24%, або 0,1324.

Норму амортизації цифрового капіталу виробничого та природоохоронного призначення ( $\eta_2, \mu_2$  відповідно у формулах (7.2) та (7.4)) визначено виходячи з рекомендацій щодо їх мінімального строку служби (ст. 138.3.3 ПКУ). Вона в обох випадках дорівнює 50%, або 0,5.

Після формування статистичної бази, коригування окремих показників, переведення даних, виражених у грошовій формі, у порівнянний вид (2010 р. – базовий)<sup>2</sup>, розрахунків коефіцієнтів формули (1-12) набули вигляду, наведеного нижче<sup>3</sup>.

$$Y = 5924,503 K_M^{0,295} L^{0,399} N^{0,085} e^{0,006t} \quad (1')$$

Значення коефіцієнтів у формулі (1') свідчить про значну роль праці та капіталу виробничого призначення у створенні доданої вартості країни. Енергоресурси та НТП незначною мірою впливають на результуючий показник. Тобто можна припустити, що продукція промисловості є праце- та капіталоємною. Частково це по-

<sup>2</sup> Переведення здійснено за допомогою дефлятора ВВП.

<sup>3</sup> Позначку «'» поряд із номером формули використано, щоб зберегти оригінальну нумерацію формул у теоретичній моделі.

яснюється тим, що у виробничій функції аналізуються показники по всій промисловості. А в Україні дещо більше 50% усієї доданої вартості промисловості створюється в добувній промисловості, яка характеризується значною капіталоємністю (Державна служба статистики України, 2020).

Інвестиції визначаються багатьма факторами, такими як: курс валют, зовнішня та внутрішня політика уряду, прогнози розвитку країни впливовими міжнародними організаціями (МВФ, СБ), вартість сировинних ресурсів на міжнародних ринках тощо. Їх моделювання потребує окремого детального дослідження. Тим не менш, здійснено дуже спрощену спробу врахувати коливання інвестицій в Україні з року в рік:

$$\begin{cases} I(t) = \rho(t)Y(t); \\ \rho(t) = 0,149t^{0,1698} \end{cases} \quad (2')$$

Слід зауважити, що при розрахунку частки загальної суми інвестицій (цифрових і нецифрових, у виробничий і природоохоронний капітал) у 2009-2019 рр. її значення у відносному вираженні в середньому за період не перевищує 20% (13% у 2009 р., 28,45% – у 2019 р.). Для порівняння: у Швейцарії частка загальної суми інвестицій у доданій вартості у 2019 р. становила 23,81%, у США – 20,18, в Іспанії – 19,83, у Південній Кореї – 30,98, в Угорщині – 22,57, Китаї – 44,87<sup>1</sup>. Тобто у відносному вираженні середній рівень інвестицій в Україні наздоганяє таку досить проблемну і фінансово нестабільну країну ЄС, як Іспанія, та відстає за цим показником від решти аналізованих країн. У випадку з інвестиціями слід орієнтуватися не лише на відносні показники, але і на абсолютне їх значення. Так, наприклад, у 2019 р. Киргизька Республіка (з часткою інвестицій промисловості в доданій вартос-

ті 32,42%) інвестувала у промисловість 767,558 млн дол. США в поточних цінах, Мексика – 81,21 млрд у поточних цінах, Іспанія – 58,72 млрд дол. США в поточних цінах. Китай з 2009 р. інвестує в розвиток своєї промисловості у 2-3 рази більші суми, ніж його основний конкурент у сфері промислового розвитку – США.

Отже, Україні, щоб мати можливість наблизитися до країн-лідерів, необхідно нарощувати обсяги інвестицій передусім у переробну промисловість, особливо в ті її сектори, де створюється продукція з високою часткою доданої вартості.

$$\begin{cases} I_M = 0,974257I, \\ I_E = 0,025743I. \end{cases} \quad (3.1')$$

Як свідчить формула (3.1'), в Україні приблизно 2,5% інвестицій направляється в капітал природоохоронного призначення. Це, з урахуванням складної екологічної ситуації в країні, дуже низький показник. Для порівняння: за даними Eurostat у 2010-2018 рр. підприємства Іспанії (в цілому, не лише промислові) інвестували в охорону довкілля від 1,1 до 2 млрд євро щорічно (у фактичних цінах), тобто від 0,1 до 0,18% ВВП країни. У свою чергу, підприємства Швейцарії інвестували в охорону довкілля від 700 млн до 1 млрд євро у фактичних цінах, або 0,15-0,16% ВВП країни відповідно. В Україні використані в моделі показники інвестицій промисловими підприємствами в охорону довкілля в середньому за 2010-2018 рр. становили 0,13% ВВП, тобто є наближеними до показників Іспанії та Швейцарії, але лише у відносному, а не в абсолютному вираженні.

Причиною низьких інвестицій у природоохоронний капітал в Україні порівняно з провідними країнами світу є те, що в Україні досі використовуються низькі ставки екологічних податків та норми екологічного регулювання. Так, в Україні ставки екологічних податків на окремі види забруднення є у 60 разів меншими, ніж використовуються в ЄС (Гаркушенко, 2016). Це не стимулює підприємства, які створюють забруднення (а промисловість належить до

<sup>1</sup> Показник розраховано за даними ресурсу *theGlobalEconomy.com: Business and economic data for 200 countries*. URL: <https://www.theglobaleconomy.com/download-data.php?strmnt> (дата звернення: 20.09.2020).

ВЕД, які найбільшою мірою забруднюють довкілля), до його скорочення ані шляхом удосконалення виробничих процесів, ані шляхом ширшого, ніж зараз, застосування природоохоронного капіталу.

$$\begin{cases} I_{M1} = (1 - c(t))I_M, \\ I_{M2} = c(t)I_M, \\ c(t) = 0,137960308t^{-0,423}. \end{cases}; \quad (4.1')$$

$$\begin{cases} I_{E1} = (1 - d(t))I_E, \\ I_{E2} = d(t)I_E, \\ d(t) = 0,133001182t^{-0,423}. \end{cases} \quad (4.2')$$

Згідно з формулами (4.1') та (4.2') в Україні інвестиції у природоохоронний капітал і капітал виробничого призначення з часом змінюються за експоненціальним законом. Аналіз цих інвестицій у порівнянних цінах (2010 р. – базовий) в обох випадках засвідчив, що вони з часом зменшуються. Тобто в Україні значення цифрових інвестицій із часом скорочується, тоді як у провідних країнах – навпаки. Так, у США при порівняно незначному у відносному вираженні загальному показнику інвестицій у науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (R&D) у 2009-2018 рр. (до 2,82% ВВП країни, або 489,23 млрд дол. у порівнянних цінах (2010 р. – базовий)) лише бізнес інвестував у сектор ІКТ від 7 до 9,4% цих сум (34,25-45,99 млрд дол. у порівнянних цінах). Підприємства Південної Кореї у 2009-2015 рр. інвестували в розвиток сектору ІКТ до 42,42% від усього обсягу інвестицій на R&D, або майже 22 млрд дол. США у порівнянних цінах (2010 р. – базовий). У 2016-2018 рр. обсяг таких інвестицій скоротився до 13% загальної суми інвестицій у R&D, що в абсолютному вираженні становило до 8,54 млрд дол. США, або майже 22 млрд дол. США у порівнянних цінах (2010 р. – базовий). В Іспанії в розвиток сектору ІКТ у 2009-2018 рр. бізнесом вкладалися найменші серед перелічених країн суми: лише 0,5% загальної суми інвестицій у R&D, або до 90,5 млн дол. США у порівнянних цінах (2010 р. – базовий).

В Україні у 2009-2018 рр. загальні інвестиції у всю промисловість з усіх можливих джерел (державна, іноземні, приватні інвестиції) становили від 0,56% (2018 р.) до 6,66% (2013 р.) ВВП країни. В абсолютному вираженні ці коливання становили від 1,82 млрд дол. США у 2017 р. до 9,4 млрд дол. США у порівнянних цінах (2010 р. – базовий) у 2013 р<sup>1</sup>. Тобто в найгірший за обсягами інвестування рік загальний обсяг інвестицій у всю промисловість України, отриманий з усіх джерел, лише у два рази перевищував суми, які бізнес Іспанії вкладає тільки в розвиток сектору ІКТ.

Формули (5.1-6.4) моделі в загальному вигляді не потребують змін, а формули (7.1-7.4) мають такий вигляд:

$$O_{M1}(t) = 0,061K_{M1}(t-1) - 16669607,6; \quad (7.1')$$

$$O_{M2}(t) = 0,5K_{M2}(t-1) - 22506413,4; \quad (7.2')$$

$$O_{E1}(t) = 0,1324K_{E1}(t-1) - 2784499,77; \quad (7.3')$$

$$O_{E2}(t) = 0,5K_{E2}(t-1) - 447872,47. \quad (7.4')$$

Аналіз формул (7.1'-7.4') дозволяє припустити, що в Україні основні нецифрові основні фонди природоохоронного та виробничого призначення є зношеними і вибувають з експлуатації через різні причини. Цей висновок у цілому кореспондується з даними Державної служби статистики України, згідно з якими знос основних фондів підприємств країни становить близько 60% (Державна служба статистики України, 2020).

$$L(t) = L(t-1) - \frac{0,014151683}{100}L(t-1) - S(t-1) + 525,785357 \quad (8')$$

Формула (8') вказує на невисоку смертність працівників на робочому місці та незначне щорічне збільшення фонду робочого часу. Втім, останнє може відбува-

<sup>1</sup> Розрахунки виконано на основі даних (Eurostat, 2020b; The WorldBank, 2020; Державна служба статистики України, 2020; Національний банк України, 2020).

тися за рахунок зменшення «прихованого» безробіття.

$$S = \frac{S\_num(t) \cdot 0,02904}{360} \cdot 4,7722. \quad (9')$$

Відповідно до формули (9') середня тривалість робочого дня в Україні у 2009-2019 рр. становила лише 4,7722 год. на добу при нормі 8 год. Це може свідчити про приховане безробіття в країні. Водночас середня тривалість захворювання становила лише 0,02904 дня на рік на 1 зайнятого у промисловості. Однак оскільки не всі хворі беруть лікарняні, а в деяких випадках (наприклад, вагітність, догляд за хворою дитиною) видача лікарняного листа не є ознакою хвороби працівника, якому він видається, цей показник є дуже приблизним.

$$S\_num(t) = 1,5837P(t)^{0,877}. \quad (10')$$

Формулу (10') можна вважати підтвердженням тези про те, що з підвищенням рівня забрудненості довкілля (у даному випадку – викидів забруднюючих речовин та вуглецевого газу стаціонарними джерелами забруднення промисловості) зростає рівень захворюваності населення.

$$P = 2,850145 K_{M1}^{0,071002} K_{M2}^{0,18297745} \cdot K_{E1}^{0,12467} K_{E2}^{0,004587388}, \quad (11')$$

Формула (11') свідчить про те, що в Україні всі види основних фондів мають негативний вплив на довкілля. Хоча слід відзначити, що цифровий капітал природоохоронного призначення має найменший негативний вплив на довкілля з усіх аналізованих видів капіталу. Частково таку ситуацію можна пояснити тим, що точно невідома структура цифрового капіталу природоохоронного призначення. Наприклад, якщо до такого капіталу відносять програмне забезпечення або апаратуру, призначену виключно для аналізу й обробки показників про стан довкілля та рівень забруднення, то вони не можуть мати прямого впливу на зменшення обсягів забруднення. Тобто для більш точних оцінок впливу цифрового природоохоронного ка-

піталу на рівень забруднення необхідно знати його структуру, що, у свою чергу, потребує розробки органами статистики України відповідних форм статистичної звітності, методології збору статистичної інформації для їх заповнення та оприлюднення отриманої інформації.

$$N = 0,2103 K_{M1}^{0,324} K_{M2}^{0,355} K_{E1}^{-0,072} K_{E2}^{-0,032}. \quad (12')$$

Аналіз формули (12') свідчить про те, що цифровий і нецифровий капітал природоохоронного призначення має опосередкований позитивний вплив на довкілля: через зменшення споживання енергії промисловими підприємствами. Це можна пояснити тим, що природоохоронний капітал, застосування якого сприяє скороченню витрат, є більш привабливим для підприємців. І навпаки – якщо підприємці вимушені витратити кошти на основні фонди природоохоронного призначення, які спрямовані лише на виконання діючих нормативів й усунення загрози штрафів, то такі вкладення є менш привабливими. Це узгоджується, наприклад, із практикою підприємств у країнах-членах ЄС. Тут інвестиції вкладаються у природоохоронний капітал, який дозволить скоротити обсяги викидів до прийнятних з позицій поточних природоохоронних вимог рівня, або в капітал, направлений на підвищення енергоефективності підприємств та їх продукції через високу вартість енергоресурсів (Al-Zamil, Jilani Saudagar AK, 2018).

Значення коефіцієнтів у формулах (1', 11', 12') одержано шляхом логарифмування та використання методу найменших квадратів. Вид функціональних залежностей і значення коефіцієнтів у формулах (4.1', 4.2', 10') знайдено за допомогою кореляційно-регресійного аналізу. Решту коефіцієнтів у формулах розраховано за наявними статистичними даними із застосуванням стандартного інструментарію MS Excel.

Модель реалізовано в середовищі PowerSim 8 Academic. Її діаграму наведено на рис. 1.

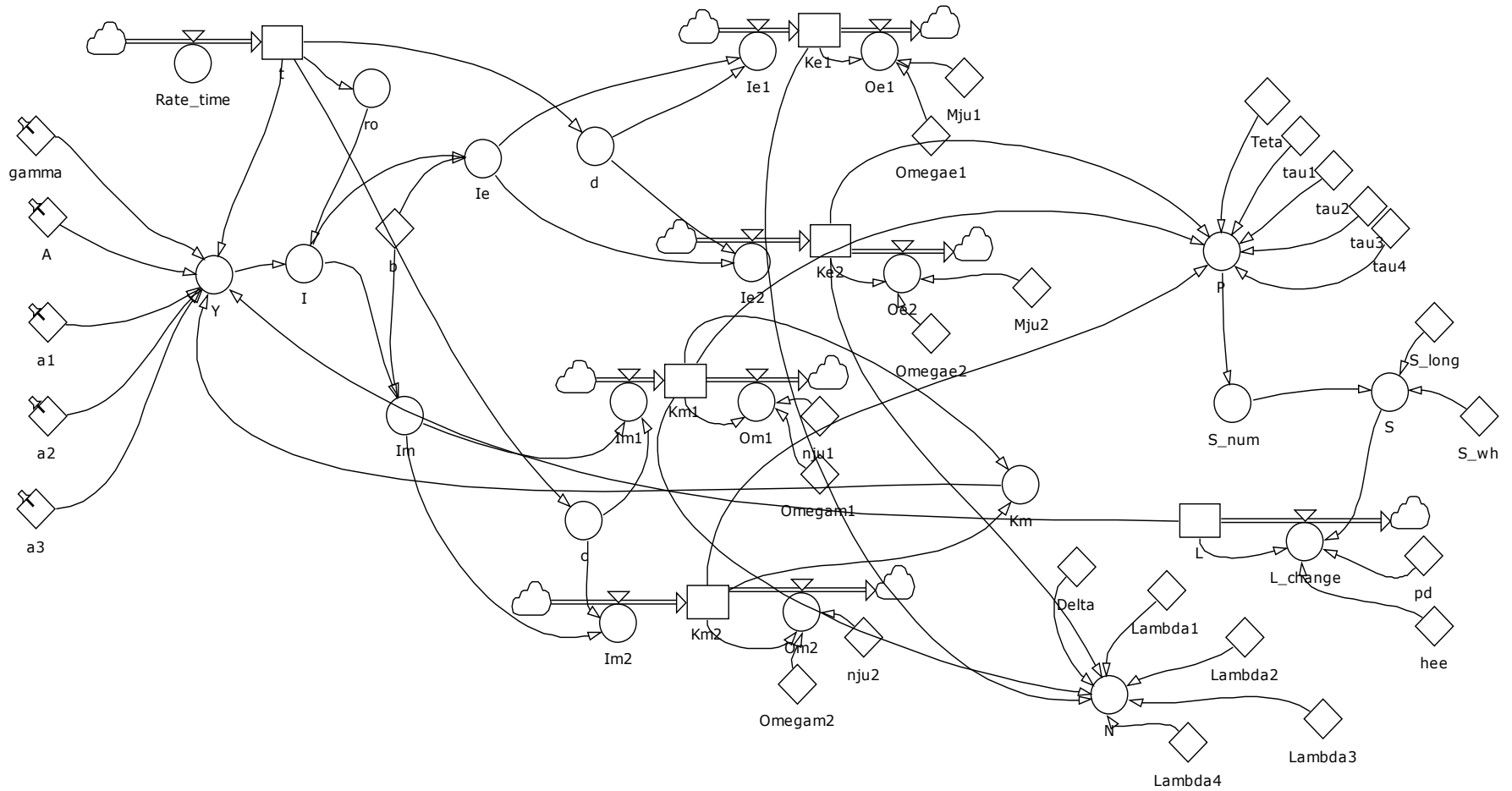


Рисунок 1 – Діаграма реалізації економіко-математичної моделі впливу цифровізації на забезпечення сталого розвитку (на прикладі України) у середовищі PowerSim 8 Academic

Джерело: складено автором.

Примітка: більш детально про елементи діаграми та їх значення див. у (Сидоренко, 2001).

Значення показників, одержаних за допомогою моделі, досить точно відображають реальність: середня помилка апроксимації не перевищує 15%. Коректність формул (1', 11', 12') додатково перевірено за допомогою критерію Фішера (F-тест), який показав, що дані, одержані із застосуванням цих формул, відповідають фактичним. Тобто формули можуть бути використані в подальшому у процесі моделювання та прогнозування.

#### *Перспективи впливу цифровізації на сталий розвиток в Україні*

Для визначення перспектив впливу цифровізації на сталий розвиток в Україні проведено два експерименти за допомогою реалізованої економіко-математичної моделі:

1) прогнозування впливу цифровізації на сталий розвиток в Україні при збереженні визначених у моделі залежностей;

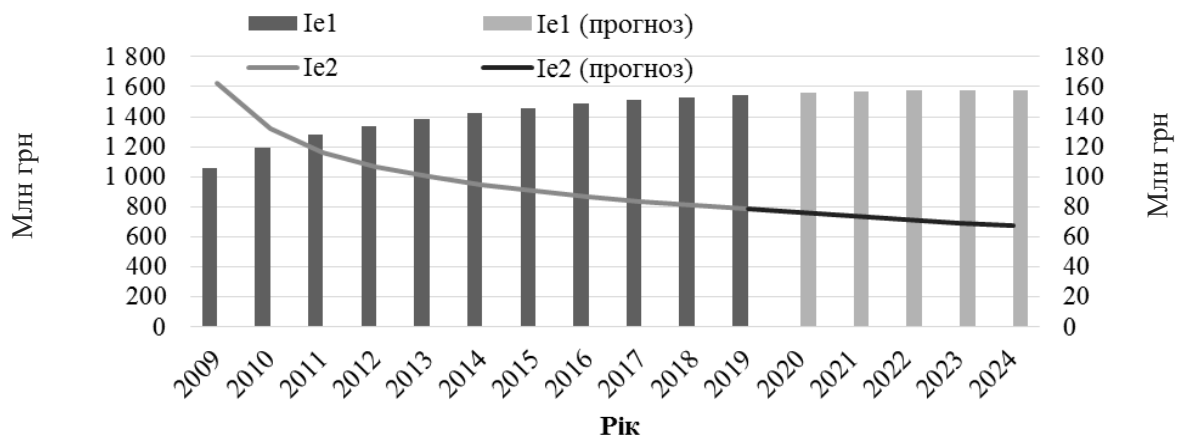
2) визначення впливу цифровізації на сталий розвиток в Україні при зміні патерну інвестицій у цифровий виробничий та природоохоронний капітал, але за умови збереження визначених у моделі інших залежностей.

Слід відзначити, що пандемія COVID-19, яка тривала протягом усього 2020 р. та продовжується досі, стала, за висловом Н. Талеба, «чорним лебедем» – неочікуваною подією, яку не можна було спрогнозувати (Талеб, 2015). В економіко-математичній моделі, розробленій на основі статистичної інформації по Україні за 2009-2019 рр., також не було передбачено цю подію. Тому перший експеримент здійснюється для гіпотетичної ситуації, тобто для випадку, якби у світі та Україні не було цієї пандемії.

Такий прогноз має на меті виявлення основних тенденцій впливу існуючих особливостей розвитку промисловості та цифровізації на стан довкілля і здоров'я зайнятих у промисловості. Це може бути корисним після завершення пандемії COVID-19 та в умовах режиму самоізоляції.

Прогноз здійснюватиметься на 5 років (2020-2024 рр.) Результати прогнозу за окремими показниками наведено на рис. 2-5.

Як свідчать дані рис. 2, за відсутності пандемії COVID-19 нецифрові інвестиції у природоохоронний капітал мали незначно зрости у 2024 р. порівняно з 2019 р. (на 1,65%), у той час як цифрові – скоротитися на 13,9%.



**Рисунок 2 – Зміна обсягу інвестицій у цифровий і нецифровий капітал природоохоронного призначення з часом (2009-2019 рр. – факт, 2020-2024 рр. – прогноз)**

Умовні позначення: Ie1 відповідає  $I_{E1}$  у моделі (інвестиції у нецифровий капітал природоохоронного призначення); Ie2 –  $I_{E2}$  (інвестиції у цифровий капітал природоохоронного призначення).

Джерело: складено автором.

Аналогічні тенденції спостерігаються щодо інвестицій у капітал виробничого

призначення (цифровий і нецифровий) (рис. 3).

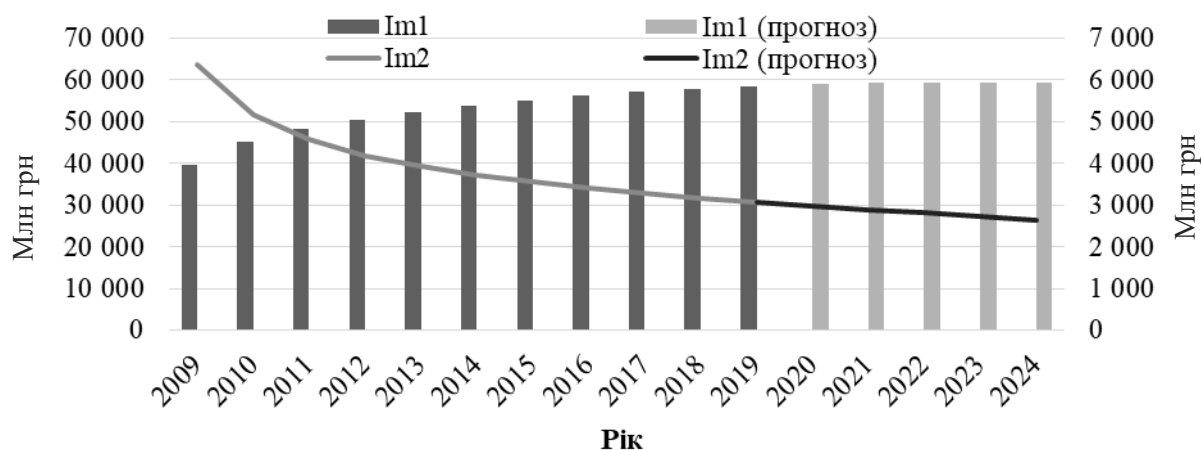


Рисунок 3 – Зміна обсягу інвестицій у цифровий і нецифровий капітал виробничого призначення з часом (2009-2019 рр. – факт, 2020-2024 рр. – прогноз)

Умовні позначення: Im1 відповідає  $I_{M1}$  у моделі (інвестиції у нецифровий капітал виробничого призначення); Im2 –  $I_{M2}$  (інвестиції у цифровий капітал виробничого призначення).

Джерело: складено автором.

За відсутності пандемії згідно з результатами моделювання інвестиції у нецифровий капітал виробничого призначення у 2024 р. мали збільшитися на 1,7% порівняно з 2019 р., а інвестиції в цифровий капітал виробничого призначення – скоротитися на майже на ті самі 13,9%, що аналогічні природоохоронним (різниця – у тисячних відсотка). У сукупності інвестиції в капітал виробничого призначення у 2024 р. мали скоротитися на 5,4% від рівня 2019 р.

Щодо інших показників, проаналізованих за допомогою моделі, то, як видно з рис. 4, за відсутності пандемії та за незмінних інших умов та закономірностей, встановлених у моделі, обсяг створення доданої вартості у промисловості у 2024 р. мав би скоротитися на 5,32% порівняно з 2019 р., тобто інвестиції в капітал виробничого призначення промисловості України майже не компенсують його існуючий знос, який тривав і впродовж 2020-2024 рр.

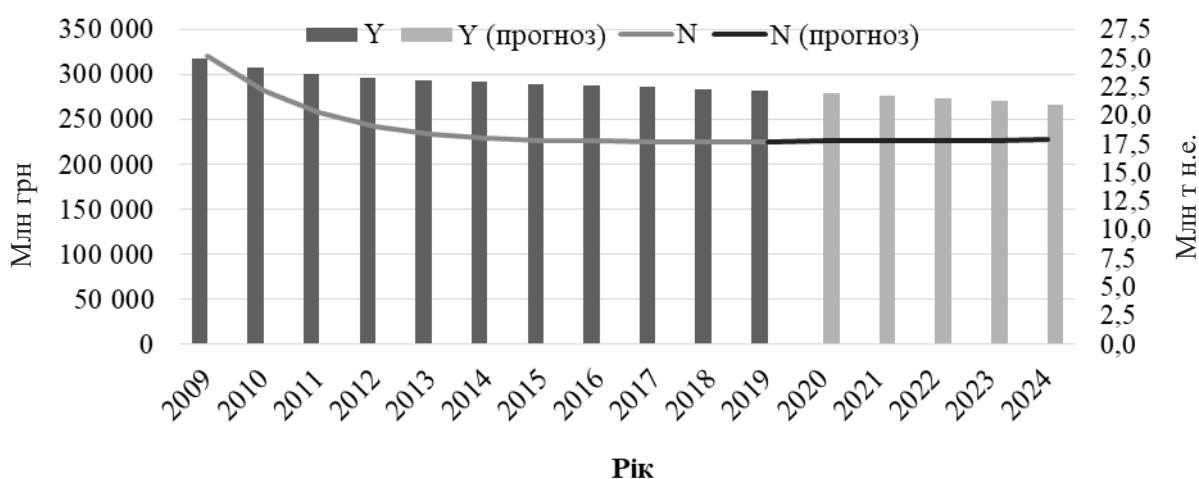


Рисунок 4 – Зміна обсягу створення доданої вартості та споживання енергоресурсів у промисловості України (2009-2019 рр. – факт, 2020-2024 рр. – прогноз)

Умовні позначення: Y – додана вартість, що утворюється у промисловості; N – енергоспоживання.

Джерело: складено автором.

Щодо енергоспоживання, то у 2024 р. за розрахунками воно мало зрости порівняно з 2019 р. на 0,8%, що може бути наслідком зростання нецифрових фондів виробничого призначення та загальної енергоємності цього сектору економіки України на 1,7%.

Щодо прогнозів кількості зайнятих, які захворіли у 2024 р., та обсягів забруд-

нення у 2024 р. порівняно з 2019 р. (рис. 5), то вони залишилися майже без змін (збільшення на 0,7 та 0,8% відповідно). На тлі скорочення обсягів створення доданої вартості це може пояснюватися як недостатньою ефективністю природоохоронних основних фондів, так і капіталоємністю промислового виробництва.

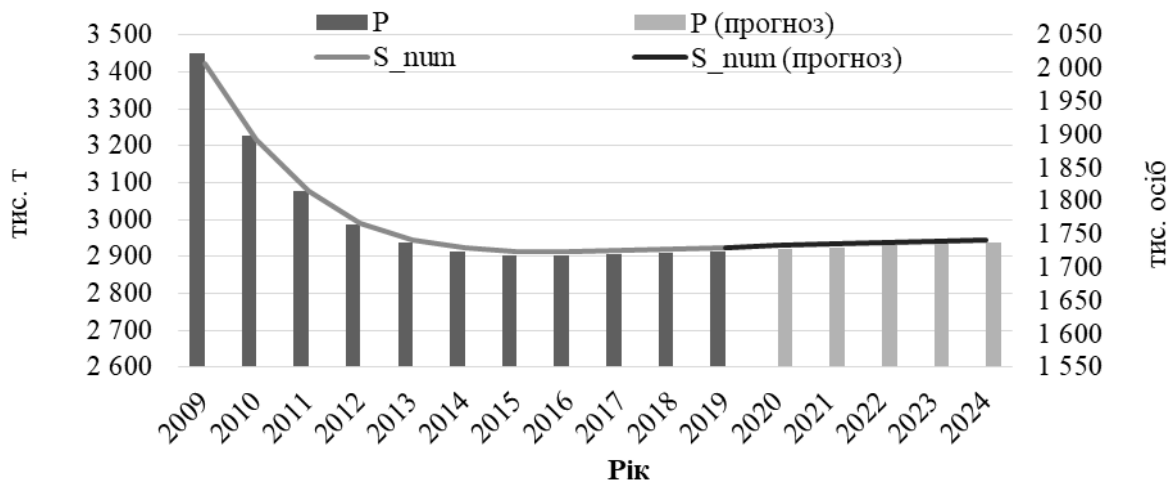


Рисунок 5 – Зміна обсягів забруднення довкілля та кількості захворілих у промисловості України (2009-2019 рр. – факт, 2020-2024 рр. – прогноз)

Умовні позначення:  $S_{num}$  – кількість зайнятих, які захворіли у відповідному році (2009-2014 рр.);  $P$  – викиди забруднюючих речовин і вуглецевого газу стаціонарними джерелами забруднення промисловості.

Джерело: складено автором.

У результаті експерименту зроблено такі висновки:

1. Станом на 2019 р. і за результатами прогнозування за допомогою моделі встановлено, що в Україні обсяг інвестицій у цифрові техніку та технології зменшується.

2. Скорочення обсягу цифрових інвестицій виробничого призначення є настільки значним, що не компенсує незначне його збільшення у нецифровий виробничий капітал, що, як наслідок, спричиняє зменшення обсягів доданої вартості, створеної у промисловості України.

3. Попри скорочення обсягів доданої вартості, рівень забруднення довкілля та захворюваності населення незначно зростатиме (0,8 та 0,7% відповідно), що опосередковано свідчить про низьку ефективність фондів природоохоронного призна-

чення та високу капіталоємність промисловості України.

4. Цифрові технології, що застосовуються в Україні у складі капіталу природоохоронного призначення, так само, як і нецифрові техніка та технології, мають вкрай незначний вплив на скорочення енергоспоживання, незрівняний зі змінами основних фондів виробничого призначення та, відповідно, створення доданої вартості у промисловості. Це може бути свідченням їх недостатнього застосування в даній сфері або застосування недостатньо ефективних техніки та технологій, а також опосередковано високої енергоємності промисловості України. Для більш чіткої відповіді на це питання потрібно знати структуру капіталу та інвестицій природоохоронного призначення, що наразі неможливо через



відсутність статистичної інформації у відкритому доступі.

Вищезазначене в цілому дозволяє дійти висновку про недостатню увагу уряду та керівництва промислових підприємств України до необхідності більш активного застосування цифрових техніки та технологій як інструменту стимулювання економічного розвитку країни й одночасного захисту довкілля і здоров'я населення. Збереження існуючих тенденцій у сфері інвестицій (у першу чергу цифрових) загрожує країні перетворенням на сировинний, аграрний, слаборозвинутий придаток провідних країн світу.

Чи достатньо зміни патернів інвестування в цифровий капітал в Україні для подолання ситуації, що склалася у промисловості, буде з'ясовано у процесі наступного експерименту.

*Експеримент 2. Зміна патернів інвестицій у цифровий капітал природоохоронного та виробничого призначення*

Мета цього експерименту – визначити, яким чином зміняться показники створення доданої вартості, енергоспоживання, обсягу забруднення промисловістю та кількості захворілих в Україні при зміні патернів інвестування у цифровий капітал (функції  $c(t)$ ,  $d(t)$ ) на ті, що властиві більш розвинутих за Україну в частині цифровізації, економічного та промислового розвитку країнам, за якими існує необхідна для розрахунків статистична інформація. Цим критеріям у рамках даної роботи відповідають Іспанія та Угорщина.

Навіть по цих країнах довелося додатково виконувати розрахунки через усереднені значення, питомі ваги та використовувати інші показники. Так, для визначення обсягу інвестицій у промисловість цих країн показник валових інвестицій по економіці (*Gross fixed capital formation*) скориговано на показник «додана вартість, що створюється в промисловості, % у ВВП», щоб отримати показник «інвестиції у промисловість, млн дол. США». Для визначення тенденцій щодо цифрових інвестицій використано показник «сектор ІКТ,

% у ВВП країни». Такий підхід не є унікальним: фахівці ОЕСР вдалися до нього при складанні звіту «Інвестиції в ІКТ у країнах ОЕСР та країна-партнерах: тренди, політика та оцінки» (ОЕСР, 2019, р. 6).

Оскільки джерелом інформації є різні ресурси (Світовий банк та Євростат) (Eurostat, 2020a; Eurostat, 2020b; World bank, 2020), частину даних переведено у порівнянний вид за допомогою дефлятора ВВП (2010 р. – базовий) та крос-курсу валют, визначеного на основі даних Національного банку України щодо середньорічного курсу долара та євро до гривні (Національний банк України, 2020).

Економіка Іспанії є більшою за економіку Угорщини. Водночас промисловість обох країн у середньому за досліджуваний період в інвестиції вкладала 20% доданої вартості, з яких 99% – в інвестиції в капітал виробничого призначення, а у природоохоронний капітал інвестувалося близько 1%. Втім, попри таку схожість у відносних показниках, в абсолютному вираженні суми інвестицій у декілька разів відрізняються. Так, в Іспанії частка сектору ІКТ у ній є нижчою за показники Угорщини та в досліджуваний період безперервно скорочується, тоді як в Угорщині – зростає (рис. 6).

Високе значення коефіцієнта детермінації Іспанії ( $R^2 = 0,7127$ ) та низьке – Угорщини ( $R^2 = 0,2334$ ) пояснюється проблемами з формуванням бази статистичної інформації по цих країнах, а також тим, що закономірності цифровізації економіки більш чітко простежуються в Іспанії та менш чітко – в Угорщині.

Для проведення експерименту в економіко-математичній моделі впливу цифровізації на забезпечення сталого розвитку, реалізованої в середовищі PowerSim на прикладі України, вихідні функції  $c(t)$  та  $d(t)$  замінено на функції з рис. 6. Така заміна одних функцій іншими може вважатися різновидом методу ланцюгової підстановки, що використовується в економічному аналізі для визначення впливу окремих чинників на результуючі показники.

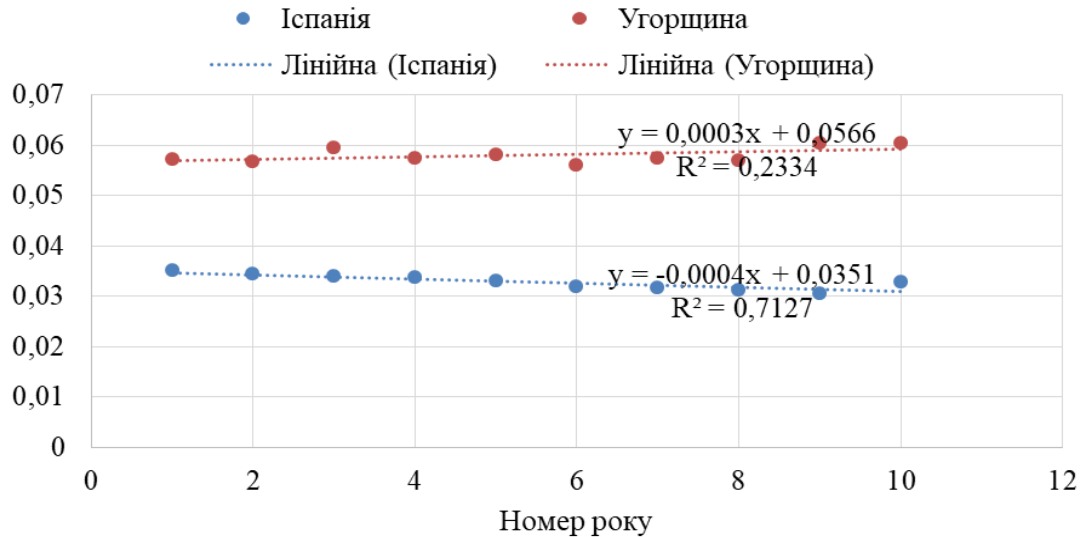


Рисунок 6 – Визначення вигляду функцій, що відображають зміну частки цифрового капіталу з часом у структурі капіталу природоохоронного та виробничого призначення в Іспанії та Угорщині

Примітка: номер року на осі абсцис відповідає номеру року в досліджуваному періоді (2009-2018 рр.), тобто 1 – 2009 р., 2 – 2010 р. і т. д.

Джерело: складено автором.

Результати заміни наведено на рис. 7-9. При заміні патернів інвестицій у цифрові техніку та технології їх обсяги у випадку з патерном Іспанії суттєво знижуються, у той час як при використанні патерну Угор-

щини – з 2015 р. вони поступово починають перевищувати показники України. Втім, на решті показників моделі це позначилося несуттєво (рис. 8, 9).

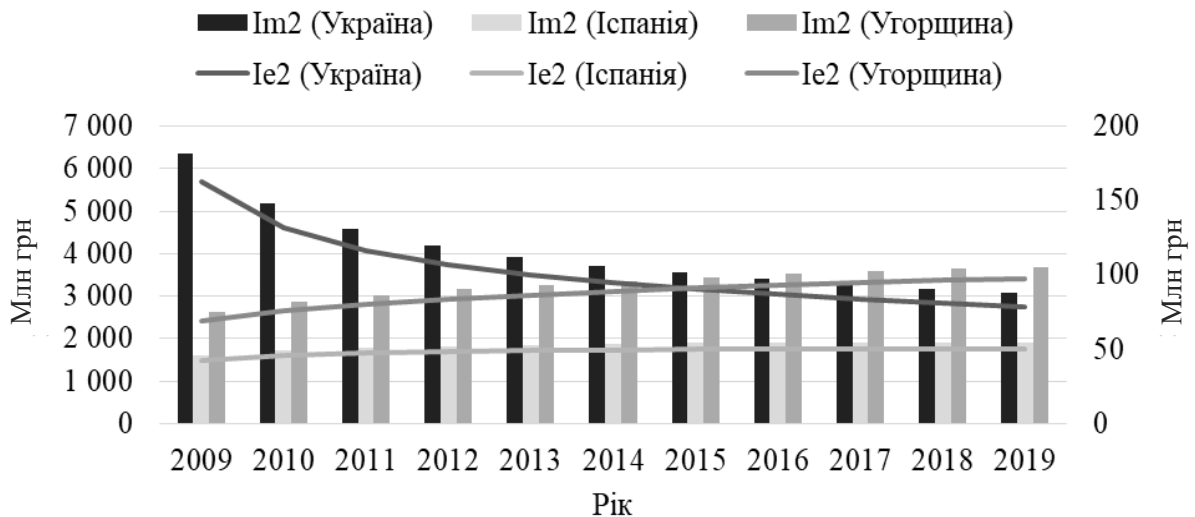


Рисунок 7 – Обсяги цифрових інвестицій за різними патернами інвестування

Примітка: після позначення показника вказано назву країни, патерн інвестування в цифрові техніку та технології якої використано в конкретному випадку.

Джерело: складено автором.

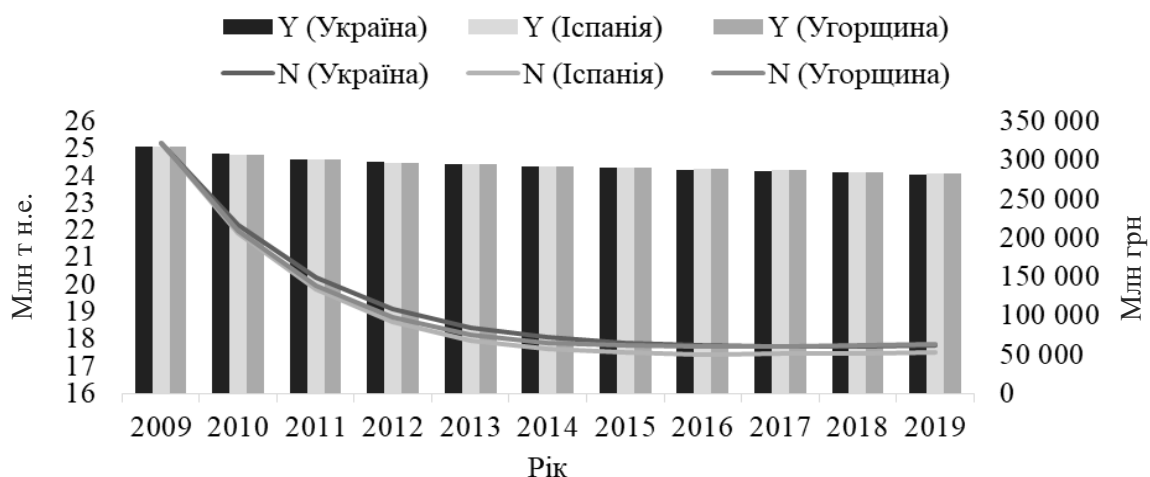


Рисунок 8 – **Обсяги доданої вартості та енергоспоживання за різними патернами інвестування у цифрові техніку та технології**

*Примітка:* після позначення показника вказано назву країни, патерн інвестування в цифрові техніку та технології якої використано в конкретному випадку.

*Джерело:* складено автором.

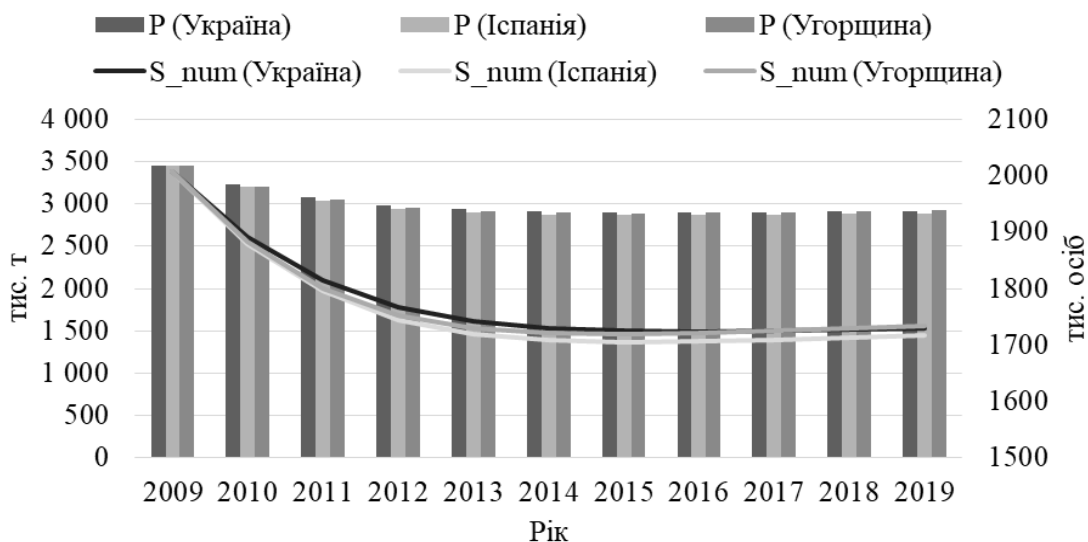


Рисунок 9 – **Обсяги забруднення атмосферного повітря стаціонарними джерелами промисловості та кількість осіб, які захворіли, за різними патернами інвестування у цифрові техніку та технології**

*Примітка:* після позначення показника вказано назву країни, патерн інвестування в цифрові техніку та технології якої використано в конкретному випадку.

*Джерело:* складено автором.

Незначне перевищення показника доданої вартості за патерном Іспанії у 2014-2019 рр. може пояснюватися тим, що падіння обсягів інвестицій у цифрові техніку та технології в цьому випадку було меншим, ніж за патерном України, та компенсувалося зростанням сумарного обсягу інвестицій в промисловості.

Як видно з рис. 7-9, попри зміну характеру та (у випадку Угорщини) напрямку інвестування в цифрові техніку та технології, що суттєво позначилося на їх обсязі (як у виробничий, так і у природоохоронний капітал), в Україні при збереженні решти умов функціонування промисловості такі показники, як додана вартість, енергоспо-

живання, захворюваність та обсяг забруднення, залишаються практично на такому самому рівні, як і до заміни.

Цей експеримент підтверджує, що «сліпо» копіювати зарубіжний досвід, або в даному випадку частину такого досвіду при збереженні решти умов без змін (без урахування існуючих умов та особливостей функціонування економічних агентів країни) недоцільно.

#### *Висновки*

1. Цифрові техніка та технології можуть стати інструментом досягнення сталого розвитку за умови, якщо вони використовуватимуться не лише для дозвілля та збільшення обсягів виробництва, але і для досягнення сталого розвитку. Наскільки сучасні ІКТ можуть допомогти в цьому, можна оцінити за допомогою економіко-математичних моделей. Проте відомі моделі оцінки наслідків цифровізації або враховують переважно економічні аспекти, або є надто узагальнюючими – не враховують ані специфіку цифрових техніки та технологій, ані особливості розвитку конкретних країн. Виходячи з цього розроблено економіко-математичну модель оцінки впливу цифровізації на сталий розвиток.

Відмінності даної моделі від відомих полягають у такому:

діяльність промисловості (основного забруднювача), її цифровізація та вплив на довкілля оцінюються у взаємозв'язку та взаємозалежності, що дозволяє більш точно визначити взаємний вплив цих чинників;

розглядається цифровізація, спрямована на виробничі процеси та інвестиції в цифровий капітал природоохоронного призначення («зелені» ІКТ), а не їх сукупність або якийсь один вид;

оцінюється вплив цифровізації на довкілля в частині як ресурсоспоживання (споживання енергії), так і утворення викидів забруднюючих речовин;

ця модель дозволяє опосередковано (через рівень забруднення довкілля) встановити вплив цифровізації на рівень захво-

руваності зайнятого у промисловості населення.

2. Зазначена модель базується на принципі системної динаміки, який широко використовується в дослідженнях проблем сталого розвитку складних систем залежно від структури їх елементів і взаємодії між ними.

Модель є універсальною в контексті предметної сфери дослідження, що також відрізняє її від відомих. В узагальненому вигляді її можна використовувати для інших країн світу, а на основі конкретної статистичної інформації – деталізувати для умов конкретної держави з метою врахування різниці в соціально-економічному розвитку та рівні цифровізації, що дасть змогу дійти більш обґрунтованих висновків за результатами розрахунків. Крім того, модель має можливість для її вдосконалення, деталізації та розширення відповідно до потреб дослідника.

Також у моделі враховано фактор НТП, що у випадку швидкої зміни цифрових техніки та технологій є надзвичайно актуальним, проте не у всіх відомих моделях ураховується.

3. За допомогою моделі проведено два обчислювальних експерименти: інерційний сценарій оцінки впливу цифровізації на сталий розвиток в Україні; сценарій зміни патернів інвестицій у цифровий капітал природоохоронного та виробничого призначення.

Встановлено, що за умов інерційного сценарію цифрові техніка та технології, які застосовуються в Україні у складі капіталу природоохоронного призначення, так само, як і нецифрові, мають вкрай незначний вплив на скорочення енергоспоживання та не сприяють суттєвому зниженню обсягів викидів забруднюючих речовин у повітря. Більше того, за умови збереження поточної ситуації викиди забруднюючих речовин у повітря у 2024 р. можуть навіть зрости на 0,8% порівняно з 2019 р. Це свідчить про їх недостатнє застосування в даній сфері або застосування недостатньо ефективних тех-

ніки та технологій, а також опосередковано про високу енергоємність промисловості України. Тобто збереження існуючих тенденцій вітчизняної промисловості загрожує їй подальшим спадом та, відповідно, відставанням від зарубіжних конкурентів, що відбуватиметься на тлі посилення екологічних проблем і зростання рівня захворюваності зайнятих у промисловості.

4. У результаті експерименту, у процесі якого патерни інвестування у цифрові техніку та технології, що використовуються в Україні, замінено на патерни інвестування більш розвинутих країн (Угорщини та Іспанії), встановлено, що:

у випадку використання патерну Іспанії відбувається скорочення обсягів інвестування в цифровий капітал природоохоронного та виробничого призначення. Як наслідок, обсяги інвестицій стають значно меншими за фактичні. При використанні патерну інвестування Угорщини напрям інвестицій змінюється на висхідний, проте перевищення обсягу інвестицій у цифровий капітал природоохоронного та виробничого призначення за фактичні значення відбувається лише у 4 роках з 11 досліджуваних і є незначним. Попри ці інвестиції як у виробничий, так і у природоохоронний капітал, в Україні при збереженні решти умов функціонування промисловості такі показники, як додана вартість, енергоспоживання, захворюваність та обсяг забруднення, залишаються практично на такому самому рівні, як і до заміни;

"сліпе" копіювання практики цифровізації інших країн при збереженні незмінними решти умов, без урахування особливостей національного інституційного середовища, ступеня розвитку науки і техніки, є недоцільним;

цифровізація сама по собі, навіть за західними взірцями, не здатна подолати сьгоднішні несприятливі тенденції розвитку України. Необхідно здійснювати фундаментальні зміни в розвитку реального сектору економіки на інноваційній основі, обсягах і структурі інвестицій, схильності

економічних суб'єктів до інвестицій, яка наразі перебуває на низькому рівні;

для екологічно безпечного розвитку цифрових технологій потрібні не окремі заходи, а створення комплексу необхідних передумов (технологічних, економічних, соціальних, інституційних), оскільки вони взаємно доповнюють і посилюють одна одну. У цьому сенсі доцільним є формування цілісної промислово-цифрової екосистеми, аналогічної європейським, але з урахуванням неоднорідності європейських економік і досвіду, а також особливостей сучасного стану і динаміки розвитку техніко-технологічного й інституційного середовища України.

Слід зауважити, що така модель наразі є спрощеним відображенням реальних соціально-економічних, економічних процесів і розвитку НТП. Проте в ній закладено можливості для розширення та конкретизації, що є перспективним напрямом подальших досліджень.

### Література

- Верховна Рада України (2020, 14 жовтня). Податковий кодекс України від 02.12.2010 № 2755-VI (редакція від 30.09.2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text> (дата звернення: 21.10.2020).
- Гаркушенко О. М., Заніздра М. Ю. (2020). "Зелені" ІКТ: потенціал і пріоритети для сталого розвитку: аналітичний огляд. *Економіка промисловості*. № 3 (91). С. 47-81. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.047>
- Гаркушенко О. М. (2016). Екологічне оподаткування: необхідність або податковий і політичний тиск. *Економіка України*. № 11 (660). С. 83-90.
- Гаркушенко О. М., Князев С. І. (2019). Аналіз економіко-математичних моделей впливу інформаційно-комунікаційних технологій на результати виробництва: чи існує парадокс Солоу? *Nauka innov*. Vol. 15(4). P. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>

- Державна служба статистики України (2020). Статистична інформація. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 21.11.2020).
- Національний банк України (2020). Офіційний курс гривні щодо іноземних валют. URL: <https://bank.gov.ua/ua/markets/exchangerates?date=18.11.2020&period=daily> (дата звернення: 18.11.2020).
- Нуреев Р. М., Латов Ю. (2007). Что такое зависимость от предшествующего развития и как ее изучают российские экономисты. *Истоки: из опыта изучения экономики как структуры и процесса*. № 6. С. 228-255.
- Сидоренко В. Н. (2001). *Системно-динамическое моделирование в среде PowerSim: Справочник по интерфейсу и функциям*. Москва: МАКС-ПРЕСС. 159 с.
- Талей Н. Н. (2015). *Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости* / пер. с англ. Капанадзе А., Сонькин В., Бердичевский А. Костионова М., Попов О. Москва: Азбука, КоЛибри. 736 с.
- Форрестер Дж. (1971). *Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика)*. Москва: Прогресс. 340 с.
- Achachlouei M. A., Hilty L. M. (2015). Modeling the effects of ICT on environmental sustainability: Revisiting a system dynamics model developed for the European commission. In *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 449-474). Springer, Cham.
- Al-Zamil A., Jilani Saudagar A. K. (2018). Drivers and Challenges of Applying Green Computing for Sustainable Agriculture: A Case Study, Sustainable Computing: Informatics and Systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.07.008> [accepted manuscript].
- Audi M., Amjad A. (2019, March). *The advancement in Information and Communication Technologies (ICT) and economic development: a panel analysis*. MPRA: Munich Personal RePEc Archive. 25 p.
- Belkhir L., Elmeligi A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*. № 177. P. 448-463. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Emas R. (2015). The Concept of Sustainable Development: Definition and Defining Principles. *United Nations Global Sustainable Development Review*. 3 p.
- Eurostat (2020a). Environmental protection expenditure by environmental domains (NACE Rev. 2, B-E). URL: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SBS\\_ENV\\_DOM\\_R2\\_\\_custom\\_157416/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SBS_ENV_DOM_R2__custom_157416/default/table?lang=en) (дата звернення: 18.11.2020).
- Eurostat (2020b). Percentage of the ICT sector on GDP. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tin00074/default/table?lang=en> (дата звернення: 18.11.2020).
- Herrero A.G., Xu J. (2018, 17 May). How big is China's digital economy? *Bruegel Working Paper*. Iss. 04. 14 p.
- Jorgenson D.W., Ho M.S., Stiroh K.J. (2003). Lessons from the U.S. Resurgence. *Journal of Policy Modelling*. 25 (5). P. 453-470.
- OECD (2019, April). ICT investments in OECD countries and partner economies: trends, policies and evaluation. *OECD digital economy papers*. № 280. Paris: OECD Publishing. 65 p.
- Solow R. (1956, Feb.). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), pp. 65-94.
- Solow R. (1957). A Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*. Vol. 39, № 3. P. 312-320.
- United Nations General Assembly (1987, 20 March). Report of the world commission on environment and development: Our common future. Oslo, Norway: United Nations General Assembly. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> (дата звернення: 08.04.2020).
- World Bank (2020). Databank. *Worldbank*. URL: <https://databank.worldbank.org/sour>

ce/world-development-indicators# (дата звернення: 18.12.2020).

### References

- Verkhovna Rada of Ukraine (2020, 14 October). The Tax Code of Ukraine from 02.12.2010 № 2755-VI (edition of 30.09.2020). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text> [in Ukrainian].
- Garkushenko, O., & Zanizdra, M. (2020). Green ICTs: potential and priorities for sustainable development. Analytical review. *Econ. promisl.*, 3 (91), pp. 47-81. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.047> [in Ukrainian].
- Garkushenko, O. (2016). Environmental taxation: necessity or taxation and political pressures. *Ekon. Ukr.*, 11 (660). pp. 83-90 [in Ukrainian].
- Harkushenko, O. M., & Knjazev, S. I. (2019). Analysis of Economic and Mathematical Models of Information and Communication Technology Effect on the Production Output: Does the Solow Paradox Exist? *Nauka innov.*, 15 (4). pp. 5-19. DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian].
- State statistics service of Ukraine (2020). Statistics. Retrieved from: <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].
- Yftional bank of Ukraine (2020). Official Exchange Rates. Retrieved from: <https://bank.gov.ua/ua/markets/exchangerates?date=18.11.2020&period=daily> [in Ukrainian].
- Nureyev, R. M., & Latov, Yu. (2007). What is path dependence and how Russian economists study it. *Origins: from the experience of studying economics as a structure and process: Almanac*, 6. pp. 228-255 [in Russian].
- Sidorenko, V. N. (2001). *System-dynamic modeling in the PowerSim environment: A reference guide to the interface and functions*. Moscow: MAKS-PRESS. 159 p. [in Russian].
- Taleb, N. N. (2015). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. Moscow: Azbuka, CoLibri, 736 p. [in Russian].
- Forrester, J. (1971). *Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers*. Moscow: Progress. 340 p. [in Russian].
- Achachlouei, M. A., & Hilty, L. M. (2015). Modeling the effects of ICT on environmental sustainability: Revisiting a system dynamics model developed for the European commission. In *ICT Innovations for Sustainability* (pp. 449-474). Springer, Cham.
- Al-Zamil, A., & Jilani Saudagar, A. K. (2018). Drivers and Challenges of Applying Green Computing for Sustainable Agriculture: A Case Study, Sustainable Computing: Informatics and Systems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.07.008> [accepted manuscript].
- Audi, M. & Amjad, A. (2019, March). *The advancement in Information and Communication Technologies (ICT) and economic development: a panel analysis*. MPRA: Munich Personal RePEc Archive. 25 p.
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177. pp. 448-463. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Emas, R. (2015). The Concept of Sustainable Development: Definition and Defining Principles. *United Nations Global Sustainable Development Review*. 3 p.
- Eurostat (2020a). Environmental protection expenditure by environmental domains (NACE Rev. 2, B-E). Retrieved from: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SBS\\_ENV\\_DOM\\_R2\\_\\_custom\\_157416/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/SBS_ENV_DOM_R2__custom_157416/default/table?lang=en)
- Eurostat (2020b). Percentage of the ICT sector on GDP. Retrieved from: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/tin00074/default/table?lang=en>
- Herrero, A. G., & Xu, J. (2018, 17 May). How big is China's digital economy? *Bruegel Working Paper*. Iss. 04. 14 p.
- Jorgenson, D. W., Ho, M. S., & Stiroh, K. J. (2003). Lessons from the U.S. Resurgence.

- Journal of Policy Modelling*, 25(5), pp. 453-470.
- OECD (2019, April). ICT investments in OECD countries and partner economies: trends, policies and evaluation. *OECD digital economy papers*. № 280. Paris: OECD Publishing. 65 p.
- Solow, R. (1956, Feb.). A Contribution to the Theory of Economic Growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70 (1), pp. 65-94.
- Solow, R. (1957). A Technical Change and the Aggregate Production Function. *The Review of Economics and Statistics*, 39 (3), pp. 312-320.
- United Nations General Assembly (1987, 20 March). Report of the world commission on environment and development: Our common future. Oslo, Norway: United Nations General Assembly. Retrieved from: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- World Bank (2020). Databank. *Worldbank*. Retrieved from: <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators#>

**Оксана Николаевна Гаркушенко,**

*канд. экон. наук, старший научный сотрудник*

Институт экономики промышленности НАН Украины  
ул. Марии Капнист, 2, г. Киев, 03057, Украина

E-mail: [garkushenko.o.n@gmail.com](mailto:garkushenko.o.n@gmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-9153-3763>

## СИСТЕМНО-ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ЦИФРОВИЗАЦИИ НА УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Такое актуальное в современном мире явление, как цифровизация, может стать инструментом достижения целей устойчивого развития. Но оно является новым, и его преимущества и угрозы еще недостаточно изучены. Частично решить эту проблему можно путем создания экономико-математических моделей оценки влияния цифровизации на устойчивое развитие. Но большинство существующих моделей в этой сфере посвящены определению влияния цифровизации на экономические аспекты деятельности стран, а природоохранные – либо игнорируются, либо представлены приблизительно, со значительным абстрагированием.

Целью статьи является разработка и реализация экономико-математической модели, которую в обобщенном виде можно использовать для различных стран мира при условии ее определенной адаптации и детализации национальных показателей. Такой подход позволяет учесть разницу в социально-экономическом положении стран и уровнях их цифровизации, что дает возможность делать более обоснованные выводы по результатам расчетов.

Предложенная модель построена на основе метода системной динамики, позволяющего учесть траекторию предыдущего развития, и реализована на примере Украины. С ее помощью проведено два вычислительных эксперимента: инерционный (прогноз на 5 лет при условии сохранения всех текущих закономерностей цифровизации экономики страны) и сценарий, при котором меняются паттерны инвестирования в цифровой капитал Украины (на паттерны европейских стран – Испании и Венгрии) при сохранении остальных условий неизменными.

С помощью этой модели определено, что цифровая техника и технологии в составе капитала природоохранного назначения промышленности Украины так же, как и нецифровые, имеют крайне малое влияние на сокращение энергопотребления и не способствуют существенному снижению объемов выбросов загрязняющих веществ в воздух. При усло-



вии сохранения текущей ситуации (инерционный сценарий) выбросы загрязняющих веществ в воздух в 2024 г. могут даже вырасти на 0,8% по сравнению с 2019 г.

В ходе эксперимента по замене паттернов инвестирования в Украине на паттерны Венгрии и Испании установлено, что, несмотря на изменение характера и (в случае Венгрии) направления инвестирования в цифровые технику и технологии, что существенно сказалось на их объеме (как в производственный, так и в природоохранной капитал), в Украине при сохранении остальных условий функционирования промышленности неизменными показатели добавленной стоимости, энергопотребления, заболеваемости трудящихся и объема загрязнения остаются практически на том же уровне, что и до замены. Поэтому "слепое" копирование практики цифровизации других стран при сохранении неизменными остальных условий, без учета особенностей национальной институциональной среды, степени развития науки и техники является нецелесообразным, поскольку не приводит к улучшению ситуации в Украине.

Доказано, что цифровизация сама по себе не способна преодолеть нынешние неблагоприятные тенденции развития Украины. Необходимо осуществлять фундаментальные изменения в развитии реального сектора экономики на инновационной основе, объемах и структуре инвестиций, склонности экономических субъектов к инвестициям, которая сейчас находится на низком уровне, а также формировать целостную промышленно-цифровую экосистему, аналогичную европейским, но с учетом неоднородности европейских экономик и их опыта, а также особенностей нынешнего состояния и динамики развития технико-технологической и институциональной среды Украины.

*Ключевые слова:* цифровизация, устойчивое развитие, экономико-математическая модель, инвестиции.

*JEL:* C61, O14, Q01

**Oksana M. Garkushenko,**

*PhD in Economics, Leading Researcher*

Institute of Industrial Economics of the NAS of Ukraine

2 Maria Kapnist Street, Kyiv, 03057, Ukraine

E-mail: garkushenko.o.n@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-9153-3763>

## SYSTEM-DYNAMIC MODEL FOR ASSESSING THE DIGITALIZATION IMPACT ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Such a timely phenomenon in the modern world as digitalization can become a tool for achieving sustainable development goals. But it is new, and its benefits and threats are not well understood. This problem can be partially solved by creating economic and mathematical models for assessing the impact of digitalization on sustainable development. Nonetheless, most of the existing models in this field are devoted to defining the impact of digitalization on the economic aspects of countries' activities, and environmental ones are either ignored or presented approximately, with significant abstraction.

Despite this, *the objective of the paper* is to develop and implement an economic and mathematical model, which in a generalized form can be used for different countries of the world, subject to its certain adaptation and detailing of national indicators. This approach allows to take into account the difference in the social and economic situation of countries and levels of their digitalization, which makes it possible to draw more valid conclusions based on the results of estimations.

The proposed model is built on the basis of the system dynamics method, which takes into account the *path-dependence*, and is implemented on the example of Ukraine. With its help, two

computational experiments were carried out: an inertial one (a forecast for 5 years, provided that all the current patterns of digitalization of the country's economy are preserved) and a scenario, in which patterns of investing in digital capital in Ukraine change (to the patterns of European countries – Spain and Hungary), while maintaining the rest conditions unchanged.

Using this model, it was defined that digital equipment and technologies as part of the environmental capital of the Ukrainian industry, as well as non-digital equipment and technologies, have an extremely small impact on reducing energy consumption and do not contribute to a significant reduction in the air pollution. Provided that the current situation persists (the inertial scenario), emissions of pollutants into the air in 2024 may even grow by 0.8% compared to 2019.

During the experiment on investment patterns' replacement in Ukraine with the patterns of Hungary and Spain, it was found that despite the change in the nature and (in the case of Hungary) the direction of investments in digital equipment and technologies, which significantly affected their amount (both in manufacturing and environmental capital), while the rest conditions for the functioning of industry remain unchanged, the indicators of value added, energy consumption, employees' sickness rate and air pollution level stay practically the same as before such a replacement. Therefore, the "blind" copying of the digitalization practices of other countries, while maintaining unchanged other conditions, without taking into account the peculiarities of the national institutional environment, the degree of development of science and technology, is inappropriate, since it does not lead to an improvement in the situation in Ukraine.

The general conclusion is that digitalization by itself is not able to reverse the current unfavorable trends in development of Ukraine for the better. It is necessary to achieve fundamental changes in the growth of the real sector of the economy on an innovative basis, in the amount and structure of investments, in the propensity of economic entities to invest, which is now at a low level, and also to form an integral industrial-digital ecosystem, similar to European ones, but taking into account the heterogeneity of European economies and their experience, as well as the characteristics of the current state and dynamics of development of the technical, technological and institutional environment of Ukraine.

*Keywords:* digitalization, sustainable development, economic and mathematical model, investments.

*JEL:* C61, O14, Q01

*Формат цитування:*

Гаркушенко О. М. (2021). Системно-динамічна модель оцінки впливу цифровізації на сталий розвиток. *Економіка промисловості*. № 1 (93). С. 20-45. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2021.01.020>

Garkushenko, O. M. (2021). System-dynamic model for assessing the digitalization impact on sustainable development. *Econ. promisl.*, 1 (93), pp. 20-45. DOI: <http://doi.org/10.15407/econindustry2021.01.020>

*Надійшла до редакції 03.02.2021 р.*