

Ольга О. Кравченко¹, Надія В. Антипенко², Надія В. Рощина³
ТРАНСМІСІЙНІ МОДЕЛІ ЯК ІНСТРУМЕНТ
ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ЕКОНОМІКИ*

Сучасний етап розвитку економіки характеризується глибокими структурними трансформаціями, що зумовлені одночасним впливом глобалізаційних процесів, швидким поширенням цифрових технологій, зростанням значення економіки знань, необхідністю врахування принципів сталого розвитку та формуванням нової хвилі неіндустріалізації, яка поєднує цифрові інновації з модернізацією виробничих систем. Цифровізація перестас бути лише технологічним трендом і перетворюється на ключовий чинник модернізації економічних та соціальних систем. Метою статті є обґрунтування застосування трансмісійних моделей як інструменту економіко-математичного моделювання в умовах цифрової економіки. Показано, що трансмісійні моделі у цифровій економіці становлять спеціалізований інструмент економіко-математичного аналізу, що на відміну від лінійних підходів здатний відображати багаторівневу природу цифрових трансформацій, включаючи прямі й опосередковані ефекти, зворотні зв'язки та порогові явища, і тим самим забезпечує більш комплексне обґрунтування політик цифрової модернізації та стійкого розвитку. Розглянуто теоретичний базис нелінійних трансмісійних моделей, який включає теорію технологічних парадигм та технологічних траєкторій, теорію поширення інновацій, ендогенність природи технологічного прогресу в цифровій економіці та концепцію цифрових платформ та екосистем. Виділено особливості використання трансмісійних моделей, а саме: високу ефективність в аналізі комплементарних і субституційних взаємодій між різними факторами цифровізації, врахування порогових ефектів та можливість відображення відстроченої динаміки впровадження цифрової трансформації. У контексті України розглянуто інтегральні моделі оцінки цифрової стійкості та резильєнтності. Показано, що використання трансмісійних моделей у цифровій економіці супроводжується методологічними обмеженнями, які обумовлені якістю та доступністю статистичних даних, часовими лагами у прояві ефектів, зовнішніми структурними спотвореннями та відсутністю стандартизованих показників цифровізації, що впливає на точність, відтворюваність і практичну застосовність результатів аналізу.

Ключові слова: трансформації, неіндустріалізація, трансмісія, моделювання, трансмісійна модель, технологічний прогрес, цифрова економіка.

Табл. 4. Літ. 20.

DOI: 10.32752/1993-6788-2026-1-297-72-84

¹ORCID: 0000-0002-2258-2828

²ORCID: 0000-0003-4132-4709

³ORCID: 0000-0003-2035-8846

¹ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

² National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

³ National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine.

* Публікація підготовлена у межах виконання науково-дослідної роботи «Трансмісійні моделі цифровізації та неіндустріального відновлення інноваційної інфраструктури» (тема № 2908Ф, номер державної реєстрації № 0126U001339), що виконується відповідно до Наказу МОН України від 09.01.2026 № 23 та Наказу КПІ ім. Ігоря Сікорського № НОН/47/26 від 26 січня 2026 року у 2026-2028 рр.

Olha Kravchenko, Nadiia Antypenko, Nadiia Roshchyna
**TRANSMISSION MODELS AS A TOOL FOR ECONOMIC
AND MATHEMATICAL MODELING IN THE CONDITIONS
OF THE DIGITAL ECONOMY**

The current stage of economic development is characterized by deep structural transformations, which are caused by the simultaneous influence of globalization processes, the rapid spread of digital technologies, the growing importance of the knowledge economy, the need to take into account the principles of sustainable development, and the formation of a new wave of neo-industrialization, which combines digital innovations with the modernization of production system. Digitalization ceases to be just a technological trend and becomes a key factor in the modernization of economic and social systems. The aim of the article is to substantiate the use of transmission models as a tool for economic and mathematical modeling in the digital economy. It is shown that transmission models in the digital economy constitute a specialized tool of economic and mathematical analysis, which, unlike linear approaches, is able to reflect the multilevel nature of digital transformations, including direct and indirect effects, feedback loops, and threshold phenomena, and thereby provides a more comprehensive justification for digital modernization and sustainable development policies. The theoretical basis of nonlinear transmission models is considered, which includes the theory of technological paradigms and technological trajectories, the theory of the diffusion of innovations, the endogeneity of the nature of technological progress in the digital economy, and the concept of digital platforms and ecosystems. The features of the use of transmission models are highlighted, namely: high efficiency in analyzing complementary and substitution interactions between various factors of digitalization, taking into account threshold effects, and the ability to reflect the delayed dynamics of the implementation of digital transformation. In the context of Ukraine, integral models for assessing digital stability and resilience are considered. It is shown that the use of transmission models in the digital economy is accompanied by methodological limitations, which are due to the quality and availability of statistical data, time lags in the manifestation of effects, external structural distortions and the lack of standardized indicators of digitalization, which affects the accuracy, reproducibility and practical applicability of the analysis results.

Keywords: transformation, neo-industrialization, transmission, modeling, transmission model, technological progress, digital economy.

Peer-reviewed, approved and placed: 16.03.2026

Постановка проблеми. Сучасні умови розвитку характеризуються глибокими структурними змінами, які обумовлюються одночасним впливом різних факторів, а саме: глобалізаційними процесами, прискореним впровадженням цифрових технологій, зростанням ролі економіки знань та необхідністю адаптації до викликів сталого розвитку. Цифровізація перестає бути лише технологічним трендом і перетворюється на ключовий драйвер економічної та соціальної модернізації як національних, так і світової економік. Вона змінює логіку функціонування інноваційної інфраструктури, формує нові канали трансмісії знань і технологій, а також створює умови для інтеграції промислових і фінансових кластерів у глобальні цифрові екосистеми.

Одним з головних проявів зміни умов розвитку є перехід від традиційних індустріальних моделей до неоіндустріальних, в яких цифрові рішення стають основою відновлення виробничих потужностей, оптимізації логістичних процесів і формування нових форматів інституційної взаємодії. Водночас,

нерівномірність цифрової зрілості різних секторів економіки та регіонів створює ризики посилення існуючих диспропорцій, що потребує розробки адаптивних моделей управління інноваційними процесами. Це обумовлює необхідність переходу від лінійних моделей розвитку до складних екосистемних взаємодій, в яких формалізуються механізми поширення цифрових імпульсів крізь систему інституційних і технологічних обмежень. Особливої актуальності це набуває у контексті подолання асиметрій цифрової зрілості, які формують нерівномірні умови для дифузії інновацій та спотворюють очікувані результати цифровізації в окремих секторах економіки. Саме тому використання трансмісійних моделей стає адекватним інструментом опису нелінійних взаємозв'язків у цифровій економіці.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання економічного розвитку, зокрема в умовах цифрової економіки знаходяться в центрі уваги провідних українських і іноземних науковців. Сучасні дослідження цифрової економіки акцентують на нерівномірності цифрової зрілості, викликах неоіндустріалізації та необхідності формування трансмісійних моделей для опису нелінійних процесів розвитку. Українські та зарубіжні науковці пропонують різні підходи до оцінки цифрової трансформації, що створює підґрунтя для комплексного аналізу. Так, Шваб К. (Schwab, K.) у концепції Четвертої промислової революції наголошує на необхідності інтеграції технологічних інновацій у систему глобального управління та освіти [1]. Панченко В. та Олійник К. роблять акцент на тому, що потенціал Індустрії 4.0 безпосередньо корелює з рівнем економічної нерівності. Автори доводять, що цифрова трансформація може як стимулювати інновації, так і посилювати асиметрію розвитку через різну швидкість адаптації технологій [2].

У той же час дослідники відзначають, що розвиток цифрової економіки неможливий без широкого застосування економіко-математичного моделювання. Так, Варіан Г. (Varian H.) досліджував проблематику теорії ігор та стратегічної взаємодії в умовах цифрових платформ. Його роботи розкривають математичну природу функціонування комп'ютеризованих ринків, механізмів онлайн-аукціонів та використання мікроданих для оптимізації рекламних стратегій [3]. Питання використання інтелектуального аналізу даних (Data Mining) та методів Big Data у фінансовому секторі висвітлені в працях Девенпорта Т. (Davenport T.) та Гарріс Дж. (Harris J.), які акцентували увагу на переході від описової статистики до предиктивної аналітики, що дозволяє підприємствам моделювати сценарії розвитку в умовах високої невизначеності цифрового середовища [4]. Ляш О., Смоляр Л. та ін. наголошували на необхідності комплексного аналізу промислово-технологічного розвитку в контексті економічної безпеки і застосовували для цього широкий спектр математичних моделей (дисперсійний аналіз, графоаналітичні і регресійні методи, кореляційні залежності) [5]. Шевчук О., Мажара Г., Гринкевич С. також використовували комбінацію статистичних (ANOVA, кореляція), економетричних (лінійна регресія) та графоаналітичних методів для комплексної оцінки впливу кризових факторів на економічну безпеку та розвиток регіонів [6]. Лазаренко І., Стець О. та ін. застосовували статистичні, економетричні та оптимізаційні методи, що дозволяють

комплексно оцінювати ризики, визначати взаємозв'язки та формувати стратегії сталого післявоєнного відновлення довкілля [7].

Однак необхідно зазначити, що цифрова економіка формує нові виклики для економіко-математичного моделювання. Нерівномірність цифрової зрілості, асиметрія розвитку та нелінійність процесів трансформації потребують інструментів, здатних враховувати складні взаємозв'язки між технологічними, соціальними та економічними факторами. Традиційні моделі економічного зростання та інноваційної динаміки часто не відображають ефектів прискорення, затримки чи мультиплікативного впливу цифрових технологій. Це обумовлює доцільність використання трансмісійних моделей як інструменту економіко-математичного моделювання в умовах цифрової економіки.

Метою статті є обґрунтування застосування трансмісійних моделей як інструменту економіко-математичного моделювання в умовах цифрової економіки.

Основні результати дослідження. Трансмісійні моделі у цифровій економіці представляють собою спеціалізований клас економіко-математичних інструментів, призначених для аналізу механізмів передачі (трансмісії) ефектів цифровізації між різними суб'єктами, секторами та рівнями економічної системи. На відміну від традиційних лінійних підходів, які припускають пропорційний та передбачуваний характер взаємозв'язків, трансмісійні моделі акцентують увагу на складній, багаторівневій природі цифрових трансформаційних процесів, включають прямі та опосередковані впливи, зворотні зв'язки, порогові явища та синергетичні ефекти, які неможливо адекватно змодельовати в рамках лінійних специфікацій [8]. У контексті неоіндустріального відновлення та сталого зростання трансмісійні моделі забезпечують інструментальну базу для обґрунтування політик цифрової трансформації [9], що дозволяє враховувати комплексну взаємодію цифрових, технологічних, інституційних, фінансових та інноваційних драйверів.

У економіко-математичному моделюванні такі моделі займають особливе місце, оскільки дозволяють подолати обмеження традиційних лінійних моделей (табл. 1). Так, лінійні моделі базуються на принципах пропорційності та адитивності, що обмежує їхню здатність відображати складні взаємозв'язки. Вони практично не враховують мережеві ефекти, порогові явища та компліментарність факторів, а їхня еластичність залишається стаціонарною, що знижує ефективність застосування лінійних моделей у цифровій економіці, де структурні зрушення та динаміка розвитку є постійними. Натомість трансмісійні моделі ґрунтуються на нелінійних і мультиплікативних залежностях, що дозволяє адекватно враховувати мережеві ефекти та порогові явища за допомогою кускових функцій і логістичних кривих. Вони забезпечують можливість моделювання компліментарності факторів та характеризуються змінною еластичністю, яка адаптується до рівня цифрової зрілості системи. Завдяки гнучкості функціональних форм трансмісійні моделі мають вищу прогностичну здатність у цифровій економіці, оскільки здатні відображати складні процеси

трансформації та взаємозалежності між економічними й технологічними чинниками. Отже, лінійні моделі залишаються корисними для базових оцінок та простих залежностей, а трансмісійні моделі виступають більш адекватним інструментом для аналізу та прогнозування в умовах цифрової економіки.

Таблиця 1. Порівняння лінійних та трансмісійних моделей у контексті економіко-математичного моделювання, складено авторами на основі [8, 10–12]

Критерій порівняння	Лінійні моделі	Трансмісійні (нелінійні) моделі
Припущення про форму залежності	Пропорційність, адитивність	Нелінійність, мультиплікативність
Відображення мережевих ефектів	Обмежене або відсутнє	Повноцінне через нелінійні функції
Порогові ефекти	Не враховуються	Використання кускових функцій, логістичних кривих
Компліментарність факторів	Ігнорується або спрощується	Врахування взаємодії факторів
Динаміка адаптації	Стаціонарна еластичність	Змінна еластичність залежно від рівня цифрової зрілості
Прогнозна здатність у цифровій економіці	Обмежена через структурні зрушення	Вища завдяки гнучкості функціональних форм

Ключовою особливістю трансмісійних моделей є їхня здатність відображати так звані «ефекти другого порядку», тобто непрямі наслідки цифрової трансформації, які проявляються із часовим лагом та через посередницькі механізми. Трансмісійні моделі дозволяють простежити багаторівневі взаємозв'язки та кумулятивні ефекти. Так, впровадження систем електронного документообігу у державних органах спершу формує безпосередній результат у вигляді підвищення адміністративної ефективності. Однак вже у середньостроковій перспективі виникають трансмісійні ефекти: зниження транзакційних витрат для бізнесу, покращення інвестиційного клімату та стимулювання розвитку суміжних цифрових послуг. Отже, трансмісійні моделі забезпечують більш комплексне відображення процесів цифрової економіки, дозволяючи враховувати як прямі, так і опосередковані наслідки трансформацій, що є критично важливим для формування стратегій сталого розвитку та підвищення економічної стійкості.

Застосування нелінійних трансмісійних моделей для аналізу цифрової трансформації ґрунтується на комплексі взаємопов'язаних теоретичних концепцій, що забезпечують багатовимірне пояснення динаміки технологічних змін та їхнього впливу на економічні системи. По-перше, теорія технологічних парадигм та технологічних траєкторій акцентує на кумулятивному та самопідсилювальному характері технологічних змін, які розвиваються через послідовність інкрементальних інновацій та радикальних зрушень. Це вимагає використання нелінійних специфікацій, здатних відобразити періодичність та нерівномірність технологічного прогресу [13].

По-друге, теорія поширення інновацій (diffusion of innovations theory) пояснює S-подібну динаміку адаптації нових технологій, що відбувається від

«новаторів» до «більшості, яка запізнюється». Така динаміка описується логістичними функціями, що особливо актуально для українського контексту, де різні регіони та галузі перебувають на різних стадіях цифрової адаптації [9].

По-третє, концепція ендogenous технологічного прогресу в цифровій економіці підкреслює наявність зворотних зв'язків між науково-дослідними та дослідно-конструкторськими роботами (НДДКР), людським капіталом та продуктивністю. Це породжує нелінійну динаміку розвитку з множинністю рівноваг та можливих траєкторій, що потребує моделювання складних взаємозалежностей [14].

По-четверте, концепція цифрових платформ та екосистем, які функціонують за логікою двосторонніх ринків, демонструє характерні нелінійності типу «курка та яйце». Ефективність платформи залежить від взаємозалежної присутності різних груп користувачів, що створює нелінійні ефекти масштабу та мережевої взаємодії [15]. Отже, трансмісійні моделі інтегрують положення кількох фундаментальних теорій, що дозволяє адекватно відображати складну природу цифрової трансформації і створює можливість моделювання як прямих, так і опосередкованих ефектів, враховувати часові лаги, порогові явища та мережеві взаємодії. Це робить їх потужним інструментом для аналізу та прогнозування процесів цифрової економіки, дозволяючи формувати більш обґрунтовані стратегії розвитку, оцінювати ризики та визначати оптимальні траєкторії технологічної та економічної еволюції.

Трансмісійні моделі розрізняють два фундаментальні типи ефектів: прямі (direct effects) та зворотні (feedback effects). Прямі трансмісійні ефекти відповідають класичному причинно-наслідковому ланцюгу, коли впровадження цифрової технології в певному секторі безпосередньо впливає на продуктивність, витрати або якість послуг у цьому ж секторі (автоматизація бухгалтерського обліку з відповідним зниженням адміністративних витрат, впровадження CRM-систем для покращення управління відносинами з клієнтами, використання ERP-систем для оптимізації ланцюгів постачання та ін.) [8].

Зворотні трансмісійні ефекти значно складніші та становлять особливу цінність для трансмісійного аналізу. Вони виникають, коли результати цифрової трансформації в одному сегменті економіки змінюють умови функціонування інших сегментів, які в свою чергу впливають на початковий сегмент. Типовим прикладом є взаємодія між розвитком електронної комерції та логістичної інфраструктури: зростання онлайн-продажів стимулює інвестиції в автоматизовані склади та системи доставки, покращення логістики знижує витрати та час доставки, що в свою чергу стимулює подальше зростання електронної комерції [9]. У моделі Сорокіної та Лебедевої зворотні ефекти проявляються у взаємодії між кількістю ІКТ-фахівців на підприємствах та обсягами електронної комерції. З одного боку, наявність кваліфікованих ІКТ-спеціалістів є передумовою розвитку електронних каналів продажів. З іншого боку, успішна реалізація електронної комерції створює попит на додаткових ІКТ-фахівців та стимулює їхню професійну мобільність. Нелінійна регресійна специфікація дозволяє зафіксувати цю

взаємозалежність через відповідну структуру коефіцієнтів моделі [8]. Важливо зазначити, що зворотні ефекти можуть бути як позитивними (самопідсилювальними), так і негативними (самогальмуючими). Позитивні зворотні зв'язки характерні для успішних цифрових екосистем, де успіх одного учасника створює умови для успіху інших. Негативні зворотні зв'язки можуть виникати при перевантаженні інфраструктури, кібератаках або втраті довіри користувачів.

При впровадженні трансмісійних моделей необхідно враховувати їх особливості використання. По-перше, висока ефективність в аналізі комплементарних і субституційних взаємодій між різними факторами цифровізації. Комплементарність (ефект доповнення) проявляється в тому, що ефективність однієї цифрової технології зростає при наявності іншої технології (комплементарність між хмарними обчисленнями та технологіями великих даних) [8]. Субституційні взаємодії (ефект заміщення), навпаки, характеризуються тим, що одна цифрова технологія може замінювати іншу без суттєвої втрати функціональності (заміщення традиційних систем електронного документообігу хмарними рішеннями типу Google Workspace або Microsoft 365). В Україні спостерігається асиметрія комплементарності, що проявляється у фрагментарному впровадженні окремих технологій без належної інтеграції, що призводить до «цифрової фасадизації»: висока якість клієнтського інтерфейсу (front-end) при збереженні застарілих алгоритмів обробки даних (back-end) [16, 17]. Так, за даними Державної служби статистики України, частка підприємств, що використовують технології штучного інтелекту, становить лише 5,4% (для підприємств з 10-49 працівників), причому цей показник практично не залежить від розміру підприємства – на відміну від країн ЄС, де великі підприємства демонструють значно вищі показники (14,5%) порівняно з малими [8].

По-друге, важливим аспектом застосування трансмісійних моделей є врахування порогових ефектів (threshold effects) цифрової трансформації, які проявляються у необхідності досягнення критичної маси цифрових компетенцій, інфраструктурної готовності, організаційної культури та екосистемної підтримки. Лише після досягнення цього порогового рівня стає можливим запуск самопідтримуваних процесів цифрової трансформації, що характеризуються ефектами масштабу та кумулятивним зростанням. Для моделювання таких явищ застосовуються кускові функції (piecewise functions), логістичні криві або індикаторні змінні, які дозволяють відобразити різні фази розвитку цифрової економіки – від початкової стадії впровадження до етапу масового поширення та стабілізації [8]. Це забезпечує більш точне відображення нелінійної природи цифрових процесів та дозволяє враховувати ефекти критичної маси, що є визначальними для успішної реалізації цифрових стратегій.

По-третє, трансмісійні моделі надають можливість відображення відстроченої динаміки впровадження цифрової трансформації, яка супроводжується так званим «продуктивним парадоксом». Його сутність полягає у тимчасовому зниженні продуктивності на початкових етапах цифровізації, що зумовлено витратами на навчання персоналу, перебудову

бізнес-процесів та інтеграцію нових технологій із наявними системами. Така динаміка є типовою для процесів цифрової адаптації, коли короткострокові втрати компенсуються довгостроковими вигодами у вигляді зростання ефективності, зниження транзакційних витрат та формування нових можливостей для інноваційного розвитку [18]. Відображення цього парадоксу у моделях дозволяє не лише пояснити тимчасові коливання продуктивності, але й прогнозувати момент переходу до фази стійкого зростання, що має ключове значення для стратегічного планування цифрової економіки.

Трансмісійні моделі цифрової трансформації репрезентують різні методологічні підходи до аналізу та оцінювання процесів цифрової економіки, що дозволяє комплексно досліджувати як прямі, так і опосередковані ефекти цифровізації (табл. 2). Застосування нелінійних регресійних моделей забезпечує кількісне виявлення причинно-наслідкових зв'язків між ключовими факторами цифрової трансформації та їхнім впливом на економічні результати, а також створює можливості для побудови прогнозів у динамічному середовищі. Індексні моделі орієнтовані на вимірювання рівня цифрової трансформації та дозволяють здійснювати міжрегіональні й міжгалузеві порівняння, що є важливим для виявлення диспропорцій та визначення пріоритетних напрямів політики. Інтегральні моделі резильєнтності спрямовані на комплексну оцінку здатності економічних і соціальних систем протистояти зовнішнім шокам та адаптуватися до нових умов, що особливо актуально в умовах кризових явищ та глобальної нестабільності [19].

Кожен із зазначених типів моделей має переваги та обмеження, які визначають можливість їхнього застосування у конкретних дослідницьких і практичних завданнях. Так, регресійні моделі забезпечують точність кількісних оцінок, але потребують якісних даних та врахування нелінійних ефектів; індексні моделі є більш універсальними для порівнянь, проте можуть спрощувати складні взаємозалежності; інтегральні моделі резильєнтності дозволяють враховувати багатофакторні впливи, але вимагають складної методологічної побудови. У сукупності ці підходи формують багатовимірний інструментарій для дослідження цифрової економіки та стійкості суспільних систем, забезпечуючи можливість поєднання кількісних і якісних методів, а також інтеграцію різних рівнів аналізу – від мікроекономічного до макроекономічного.

Трансмісійні моделі в цифровій економіці передбачають інтеграцію кількісних та якісних методів аналізу, що обумовлюється специфікою об'єкта дослідження: багато аспектів цифрової трансформації (наприклад, якість користувацького досвіду, рівень цифрової довіри, організаційна культура інновацій) принципово важко піддаються прямому кількісному вимірюванню, але суттєво впливають на трансмісійні механізми [8].

У практиці моделювання цифрової трансформації в Україні якісні методи застосовуються на різних етапах. На етапі конструювання індексів – якісні судження експертів використовуються для визначення переліку релевантних індикаторів та їхньої вагової значущості. Зокрема, при розробці Індексу цифрової проникності враховувалися «певні якісні характеристики (такі як

історичний контекст економічного розвитку України, темпи цифровізації та її стратегічне бачення в країні, поточні шоки тощо)» [8].

Таблиця 2. Типи трансмісійних моделей для моделювання цифрової трансформації, складено авторами на основі [8, 9, 19]

Характеристика	Нелінійні регресійні моделі	Індексні моделі	Інтегральні моделі резильєнтності
Основне призначення	Кількісна оцінка причинно-наслідкових зв'язків	Вимірювання рівня цифрової трансформації	Оцінка здатності протистояти шокам
Необхідні дані	Залежна та незалежні змінні	Тільки індикатори цифровізації	Багатовимірні дані за секторами
Результат	Коефіцієнти, еластичності, прогнози	Інтегральний індекс, рейтинги	Індекс стійкості, вразливості
Переваги	Прогнозна здатність, тестування гіпотез	Простота, порівнянність, незалежність від результатів	Комплексність, орієнтація на стійкість
Обмеження	Вимогливість до даних, ризик специфікації	Суб'єктивність порогів, втрата інформації при бінаризації	Складність, агрегація неспівмірних показників
Приклади застосування в Україні	Модель впливу цифровізації на додану вартість	Індекс цифрової проникності, Індекс цифрової трансформації регіонів	Інтегральний індекс цифрової стійкості

На етапі інтерпретації результатів – якісний аналіз дозволяє пояснити аномалії та несподівані закономірності, виявлені кількісними моделями. Так, відсутність залежності використання технологій ШІ від розміру підприємства в Україні потребує якісного пояснення через призму воєнних умов, міграції кваліфікованого персоналу та дисфункцій ринку інновацій.

У контексті України, що переживає повномасштабну війну, особливу цінність представляють інтегральні моделі оцінки цифрової стійкості (digital resilience) та резильєнтності, оскільки вони орієнтовані не просто на вимірювання рівня цифровізації, а на оцінку здатності економічної системи протистояти шокам та адаптуватися до змін завдяки цифровим можливостям. Зараз Україна має помірний рівень цифрової стійкості, оскільки існують вразливості в секторі домогосподарств (значні диспропорції в цифровій грамотності населення, доступності якісних ІКТ-технологій, розвитку законодавства про захист персональних даних) та бізнес-секторі (обмежена автоматизація, недостатнє використання хмарних обчислень та технологій штучного інтелекту) (табл. 3). Найвищий рівень цифрової стійкості демонструє державний сектор, що пояснюється масштабними цифровими трансформаціями та розвитком електронних послуг, ініційованими Міністерством цифрової трансформації [19].

Таблиця 3. Рівні цифрової стійкості за секторами, складено авторами на основі [19]

Сектор	Рівень цифрової стійкості	Ключові характеристики
Державне управління	Високий	Масштабні цифрові трансформації (Дія, Prozorro), розвинена інфраструктура електронних послуг, централізоване планування розвитку
Бізнес	Середній	Значна варіативність за розміром та сектором, сильний ІТ-сектор, але слабка цифровізація традиційних галузей
Домогосподарства	Низький	Значні диспропорції в цифровій грамотності, обмежена доступність якісних ІКТ-технологій в деяких регіонах, недорозвинене законодавство про захист персональних даних

Використання трансмісійних моделей у цифровій економіці пов'язано з системою обмежень, пов'язаних із доступністю та якістю статистичних даних, часовими лагами у прояві ефектів, структурними спотвореннями, спричиненими зовнішніми чинниками, а також відсутністю стандартизованих рівнів цифровізації (табл. 4). Сукупність цих факторів формує методологічні виклики, які впливають на точність, відтворюваність та практичну застосовність результатів аналізу.

Попри наявні обмеження, трансмісійні моделі у цифровій економіці є перспективним інструментом для дослідження взаємозв'язків між технологічними інноваціями та економічним розвитком. Їх застосування стимулює пошук нових методологічних рішень, удосконалення системи збору та публікації даних, а також формування стандартизованих показників цифровізації, що сприятиме підвищенню якості стратегічного планування й розробки ефективної економічної політики.

Висновки. Отже, трансмісійні моделі займають провідне місце в економіко-математичному моделюванні цифрової економіки. Вони дозволяють подолати обмеження традиційних лінійних моделей, забезпечуючи врахування нелінійних залежностей, мережевих ефектів, порогових явищ та компліментарності факторів. Завдяки змінній еластичності та здатності відображати як прямі, так і зворотні ефекти, трансмісійні моделі створюють можливості фіксування «ефектів другого порядку» та відстроченої динаміки цифрової трансформації. Інтеграція положень теорії технологічних парадигм, поширення інновацій, ендогенного технологічного прогресу та концепції цифрових платформ забезпечує багатовимірне пояснення процесів цифровізації. Це робить трансмісійні моделі потужним інструментом для аналізу й прогнозування, формування стратегій сталого розвитку та підвищення економічної стійкості.

Подальші дослідження слід спрямувати на поглиблення методології моделювання, зокрема через удосконалення нелінійних специфікацій та інтеграцію з методами машинного навчання й штучного інтелекту. Важливим є також аналіз порогових і відстрочених ефектів, що дозволить точніше відображати динаміку цифрової адаптації та «продуктивний парадокс».

Таблиця 4. Обмеження ефективності використання трансмісійних моделей у цифровій економіці, складено авторами на основі [8, 14, 17, 19, 20]

Фактор	Прояви	Наслідки
Обмеженість офіційної статистики	Критично важливі для аналізу показників або взагалі не збирається, або не публікується в доступній формі	Методологічна неповнота аналізу, зниження достовірності результатів, унеможливлення відтворюваності досліджень та обмеження практичної релевантності результатів для стратегічного планування та розробки економічної політики
Обмеження часового горизонту аналізу	Ефект від імпульсу проявляється через 12–18 місяців, а зміни відбуваються швидше через екзогенні шоки (безпекові ризики, руйнування інфраструктури тощо)	Неможливість оцінки динаміки та трендів цифрової трансформації, неможливість виявлення причинно-наслідкових зв'язків між політичними інтервенціями та результатами, обмежена корисність для оцінки ефективності державних програм цифровізації
Систематичні спотворення даних через повномасштабне вторгнення 2022 року	Виключення з аналізу території з найбільш руйнівним досвідом цифрової трансформації (окуповані території та зони активних бойових дій)	Створення структурних зрушень в національній статистиці, не пов'язаних з реальними процесами цифрової трансформації
Визначення порогових значень для індикаторів цифрової трансформації	Відсутність рівнів (стандартів) цифровізації для оцінювання впливу економічний розвиток	Методологічна невизначеність, обмежена прогностичність та зниження ефективності економічної політики
Статичність трансмісійних моделей в Україні в умовах екстремальної динаміки цифрових інновацій	Моделі оцінюють стан системи в певний момент часу	Неспроможність адекватного відображення швидкості змін, прискорення та зміни напрямків цифрової трансформації

Окремої уваги потребує вивчення комплементарності та субституційності цифрових технологій, моделювання зворотних трансмісійних ефектів у цифрових екосистемах, а також регіональний і секторальний вимір цифрової зрілості. Практичне застосування трансмісійних моделей має бути орієнтоване на розробку стратегій цифрової безпеки, стійкості та оцінку ефективності державних програм цифровізації.

1. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. Geneva: World Economic Forum; New York: Crown Business, 2017.

2. Panchenko V., Oliinyk, K. Transformation potential of the digital economy and Industry 4.0 for innovative and industrial development and economic inequality. *Agrosvit*. 2025. 57-67. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.17.57>.
3. Varian H. R. Artificial intelligence, economics, and industrial organization. National Bureau of Economic Research (NBER). 2018. Working Paper No. 24839. URL: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w24839/w24839.pdf.
4. Davenport T. H., Harris J. *Competing on analytics: The new science of winning*. Harvard Business School Press. 2007.
5. Ilyash, O., Smoliar, L., Lupak, R., Duliaba, N., Dzhadan, I., Kohut, M., & Radov, D. Multidimensional analysis and forecasting the relationship between indicators of industrial-technological development and the level of economic security. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 5(13 (113)). 14–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243262>.
6. Shevchuk O., Ilyash O., Mazhara G., Roshchyna N., Hrynkevych S., Lavrov R., Kozlovskiy S. Modeling Regional Sustainable Development in Ukrainian Crisis and War. *Problemy Ekorozwoju*. 2023. 18(1)2023: 37-50. <https://doi.org/10.35784/pe.2023.1.04>.
7. Shevchuk O., Rochshyna N., Lazarenko I. and Stets O. Towards a sustainable future: overcoming the challenges of post-war ecosystem reconstruction in Ukraine IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1269, 3rd International Conference on Environmental Sustainability in Natural Resources Management. 2023. 1269(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1269/1/012018>.
8. Sorokina A. Lebedeva L. The impact of digital transformation on enterprises' resilience: Evidence from Ukraine, *Agora International Journal of Economical Sciences (AIJES)*, ISSN 2067-7669, Agora University Press, Oradea. 2025. Vol. 19, Iss. 1. 303-314. <https://doi.org/10.15837/aijes.v19i1.7161>.
9. EU4DIGITAL. (2023). Ukraine's index of digital transformation study reveals regional results. URL: <https://eufordigital.eu/ukraines-index-of-digital-transformation-study-reveals-regional-results/>.
10. Terasvirta T., Tjostheim D., & Granger C. W. J. *Modelling nonlinear economic time series*. Oxford University Press, 2010. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199587148.001.0001>.
11. Akaev A., Sadovnichiy V. Information models for forecasting nonlinear economic dynamics in the digital era. *Applied Mathematics*. 2021. 12. 171-208. <https://doi.org/10.4236/am.2021.123012>.
12. Bellantuono N., Nuzzi A., Pontrandolfo P., Scozzi B. Digital Transformation Models for the I4.0 Transition: Lessons from the Change Management Literature. *Sustainability*. 2021. 13. Article 12941. <https://doi.org/10.3390/su132312941>.
13. Perez C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*. 2010. 34(1). 185–202. <https://doi.org/10.1093/cje/bep051>.
14. Ukraine: digital development country profile. URL: <https://www.digitaleconomy.gov.ua/ua/ukraine-digital-development-country-profile>. Profile_Advanced Draft_V1 1_03.25.pdf.
15. World Trade Organization. Trade Policy Review. (2024). URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/tpr_e/s467_e.pdf.
16. Brynjolfsson E., Hitt L. Beyond computation: information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives*. 2000. 14. <https://doi.org/10.1257/jep.14.4.23>.
17. OECD. Digitalization for recovery in Ukraine. OECD Policy Responses on the Impacts of the War in Ukraine, OECD Publishing, Paris, 2010. URL: <https://doi.org/10.1787/c5477864-en>.
18. Franses P.H. (Distributed Lags. In: *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan, London, 2018. URL: https://doi.org/10.1057/978-1-349-95189-5_2612.
19. Shkuropadska D., Lebedeva L., Shtunder I., Ozhelevskaya, T., Khrustalova V. The impact of demographic resilience on the economic development of countries (on the example of the Visegrad group countries). *Financial and credit activity: problems of theory and practice*. 2024. 54. 552–563. <https://doi.org/10.55643/fcaptp.1.54.2024.4279>.
20. OECD. *OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the technology frontier*. OECD Publishing, 2024. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook-2024-volume-1_a1689dc5-en.html.

1. Schwab K. *The Fourth Industrial Revolution*. Geneva: World Economic Forum; New York: Crown Business, 2017. 192 p.

2. Panchenko V., Oliinyk, K. Transformation potential of the digital economy and Industry 4.0 for innovative and industrial development and economic inequality. *Agrosvit*. 2025. 57-67. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2025.17.57>.

3. Varian H. R. Artificial intelligence, economics, and industrial organization. National Bureau of Economic Research (NBER). 2018. Working Paper No. 24839. URL: https://www.nber.org/system/files/working_papers/w24839/w24839.pdf.
4. Davenport T. H., Harris J. Competing on analytics: The new science of winning. Harvard Business School Press. 2007.
5. Ilyash, O., Smoliar, L., Lupak, R., Duliaba, N., Dzhadan, I., Kohut, M., & Radov, D. Multidimensional analysis and forecasting the relationship between indicators of industrial-technological development and the level of economic security. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 5(13 (113)). 14–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.243262>.
6. Shevchuk O., Ilyash O., Mazhara G., Roshchyna N., Hrynkevych S., Lavrov R., Kozlovskiy S. Modeling Regional Sustainable Development in Ukrainian Crisis and War. *Problemy Ekorozwoju*. 2023. 18(1)2023: 37-50. <https://doi.org/10.35784/pe.2023.1.04>.
7. Shevchuk O., Rochshyna N., Lazarenko I. and Stets O. Towards a sustainable future: overcoming the challenges of post-war ecosystem reconstruction in Ukraine IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 1269, 3rd International Conference on Environmental Sustainability in Natural Resources Management. 2023. 1269(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1269/1/012018>.
8. Sorokina A. Lebedeva L. The impact of digital transformation on enterprises' resilience: Evidence from Ukraine, *Agora International Journal of Economical Sciences (AIJES)*, ISSN 2067-7669, Agora University Press, Oradea. 2025. Vol. 19, Iss. 1. 303-314. <https://doi.org/10.15837/aijes.v19i1.7161>.
9. EU4DIGITAL. (2023). Ukraine's index of digital transformation study reveals regional results. URL: <https://eufordigital.eu/ukraines-index-of-digital-transformation-study-reveals-regional-results/>.
10. Terasvirta T., Tjostheim D., & Granger C. W. J. Modelling nonlinear economic time series. *Oxford University Press*, 2010. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199587148.001.0001>.
11. Akaev A., Sadovnichiy V. Information models for forecasting nonlinear economic dynamics in the digital era. *Applied Mathematics*. 2021. 12. 171-208. <https://doi.org/10.4236/am.2021.123012>.
12. Bellantuono N., Nuzzi A., Pontrandolfo P., Scozzi B. Digital Transformation Models for the I4.0 Transition: Lessons from the Change Management Literature. *Sustainability*. 2021. 13. Article 12941. <https://doi.org/10.3390/su132312941>.
13. Perez C. Technological revolutions and techno-economic paradigms. *Cambridge Journal of Economics*. 2010. 34(1). 185–202. <https://doi.org/10.1093/cje/bep051>.
14. Ukraine: digital development country profile. URL: [Ukraine Digital Development Country Profile_Advanced Draft_V1_1_03.25.pdf](https://www.digitaleconomy.gov.ua/ua/ukraine-digital-development-country-profile-advanced-draft-v1-1-03-25.pdf).
15. World Trade Organization. Trade Policy Review. (2024). URL: https://www.wto.org/english/tratop_e/tptr_e/s467_e.pdf.
16. Brynjolfsson E., Hitt L. Beyond computation: information technology, organizational transformation and business performance. *Journal of Economic Perspectives*. 2000. 14. <https://doi.org/10.1257/jep.14.4.23>.
17. OECD. Digitalization for recovery in Ukraine. OECD Policy Responses on the Impacts of the War in Ukraine, OECD Publishing, Paris, 2010. URL: <https://doi.org/10.1787/c5477864-en>.
18. Franses P.H. (Distributed Lags. In: *The New Palgrave Dictionary of Economics*. Palgrave Macmillan, London, 2018. URL: https://doi.org/10.1057/978-1-349-95189-5_2612.
19. Shkuropadska D., Lebedeva L., Shtunder I., Ozhelevskaya, T., Khrustalova V. The impact of demographic resilience on the economic development of countries (on the example of the Visegrad group countries). Financial and credit activity: problems of theory and practice. 2024. 54. 552–563. <https://doi.org/10.55643/fcaptop.1.54.2024.4279>.
20. OECD. OECD Digital Economy Outlook 2024 (Volume 1): Embracing the technology frontier. OECD Publishing, 2024. https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-economy-outlook-2024-volume-1_a1689dc5-en.html.