

Віталій В. Опанасюк*

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕОРІЇ КРИТИЧНОЇ КОНВЕРГЕНЦІЇ: МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ

Стаття присвячена економіко-математичному обґрунтуванню положень економічної теорії критичної конвергенції, яка розглядає великі соціально-економічні трансформації як результат взаємодії кількох глобальних процесів, що одночасно наближаються до своїх критичних порогових значень. На відміну від традиційних підходів, які переважно аналізують окремі фактори економічного розвитку, теорія критичної конвергенції виходить із системної взаємодії технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій, здатних формувати нелінійні ефекти глобального масштабу. У статті здійснено економіко-математичне обґрунтування основних положень теорії шляхом формалізації її категоріального апарату, системи показників та інтегрального індексу критичної конвергенції. Узагальнено механізми взаємодії окремих конвергенцій, розкрито логіку формування резонансних ефектів та переходу соціально-економічних систем до критичного режиму функціонування. На основі розробленого економіко-математичного інструментарію запропоновано підхід до сценарного моделювання можливих траєкторій розвитку глобальної економіки залежно від інтенсивності накопичення критичних факторів. Верифікацію положень теорії здійснено шляхом зіставлення результатів моделювання з перебігом сучасних глобальних процесів, зокрема пандемії COVID-19, світової енергетичної кризи, російсько-української війни, демографічних трансформацій у розвинених країнах та прискореного розвитку технологій штучного інтелекту. Отримані результати підтверджують можливість використання економічної теорії критичної конвергенції як методологічної основи для довгострокового прогнозування нелінійних соціально-економічних трансформацій, оцінювання системних ризиків та розроблення стратегічних управлінських рішень. Результати дослідження можуть бути корисними для науковців, державних органів, міжнародних організацій та аналітичних центрів, які здійснюють прогнозування глобальних соціально-економічних трансформацій. Запропонований інструментарій може застосовуватися для раннього виявлення системних ризиків, сценарного оцінювання критичних змін і обґрунтування стратегічних управлінських рішень.

Ключові слова: критична конвергенція; економіко-математичне моделювання; інтегральний індекс критичної конвергенції; сценарне моделювання; глобальні соціально-економічні трансформації; системні ризики; верифікація економічної теорії.

Табл. 2. Формл. 10. Літ. 25.

DOI: 10.32752/1993-6788-2026-1-301-435-448

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6569-9738>

Vitaliy Opanasyuk

ECONOMIC AND MATHEMATICAL SUBSTANTIATION OF THE THEORY OF CRITICAL CONVERGENCE: MODELING AND VERIFICATION

The article is devoted to the economic and mathematical substantiation of the theory of critical convergence, which interprets large-scale socio-economic transformations as the result of the interaction of several global processes simultaneously approaching their critical threshold values.

* Kyiv International University, Ukraine.

Unlike conventional approaches that primarily examine individual drivers of economic development, the theory of critical convergence is based on the systemic interaction of technological, demographic, resource, and institutional convergences capable of generating nonlinear effects on a global scale. The study provides an economic and mathematical substantiation of the core propositions of the theory through the formalization of its conceptual framework, system of indicators, and the integrated Critical Convergence Index. The mechanisms governing the interaction among individual convergences are generalized, the formation of resonance effects is explained, and the transition of socio-economic systems into a critical operating regime is described. Based on the proposed analytical framework, an approach to scenario modeling is developed to assess possible trajectories of global economic development depending on the accumulation of critical factors. The theoretical propositions are verified through comparison with major contemporary global transformations, including the COVID-19 pandemic, the global energy crisis, the Russian-Ukrainian war, demographic changes in developed economies, and the rapid advancement of artificial intelligence technologies. The obtained results demonstrate that the theory of critical convergence can serve as a methodological framework for long-term forecasting of nonlinear socio-economic transformations, assessment of systemic risks, and development of strategic policy decisions. The results of the study may be useful for scientists, government agencies, international organizations, and think tanks that forecast global socio-economic transformations. The proposed toolkit can be used for early detection of systemic risks, scenario assessment of critical changes, and justification of strategic management decisions.

Keywords: critical convergence; economic and mathematical modeling; Critical Convergence Index; scenario modeling; global socio-economic transformations; systemic risks; theory verification.

Peer-reviewed, approved and placed: 07.07.2026

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Сучасні соціально-економічні трансформації дедалі частіше виникають не внаслідок дії одного домінуючого чинника, а через одночасне накопичення технологічних, демографічних, ресурсних та інституційних дисбалансів. Їх взаємодія здатна створювати нелінійні ефекти, за яких сукупний вплив факторів перевищує суму їх окремих впливів, а соціально-економічна система переходить від відносно стійкого розвитку до нестійкості, біфуркацій і масштабних структурних змін. Традиційні прогностичні моделі, засновані переважно на екстраполяції окремих тенденцій, не повною мірою враховують таку багатофакторну взаємозалежність і резонансний характер сучасних криз.

Економічна теорія критичної конвергенції пропонує розглядати великі соціально-економічні трансформації як результат зближення технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій із критичними пороговими станами. Для підтвердження пояснювальної та прогностичної спроможності цієї теорії необхідні формалізація її базових положень, побудова інтегрального індексу, визначення порогових інтервалів, моделювання альтернативних траєкторій і верифікація на прикладах реальних системних трансформацій.

Аналіз останніх публікацій по проблемі. Теоретичні передумови дослідження критичної конвергенції формувалися на перетині кількох наукових напрямів: теорій економічних циклів і структурних трансформацій, еволюційної та інноваційної економіки, досліджень технологічної

сингулярності, інституціоналізму, теорії складних адаптивних систем, нелінійної динаміки та сценарного прогнозування. Вихідні положення еволюційного аналізу економічного розвитку були сформовані Й. Шумпетером, який пов'язував якісні зміни економічної системи з інноваціями, підприємництвом і процесом творчого руйнування [1]. У межах цього підходу технологічний розвиток розглядається не як рівномірне накопичення вдосконалень, а як послідовність структурних зламів, що руйнують попередні виробничі та інституційні конфігурації.

Подальший розвиток теорії технологічно зумовленого економічного зростання пов'язаний із працями лауреата Премії Шведського центрального банку з економічних наук пам'яті Альфреда Нобеля П. Ромера. Його теорія ендегенного зростання обґрунтовує здатність знань, людського капіталу та технологічних інновацій забезпечувати зростаючу віддачу і довгостроково змінювати траєкторії економічного розвитку [2]. Теорія зростання через творче руйнування Ф. Агіона та П. Говітта доповнює цей підхід поясненням механізму, за якого нові технології витісняють попередні виробничі структури та формують нові цикли продуктивності й конкуренції [3].

Важливе методологічне значення мають праці лауреата цієї премії В. Нордгауса, який інтегрував кліматичні та ресурсні обмеження до моделей довгострокового економічного розвитку [4; 5]. Розроблені ним інтегровані оцінювальні моделі підтвердили можливість поєднання економічних, технологічних і природно-ресурсних показників у межах єдиного модельного контуру.

У працях [6–8] якість інститутів, правила економічної взаємодії, розподіл влади та здатність держави забезпечувати виконання правил розглядаються як фундаментальні чинники довгострокового розвитку. Для економічної теорії критичної конвергенції цей напрям має подвійне значення. З одного боку, інституційні дисфункції утворюють самостійний вимір трансформаційного напруження. З іншого боку, інституційна спроможність виконує адаптаційну функцію та визначає, чи трансформуються технологічні, демографічні і ресурсні зміни у модернізаційний або деградаційний сценарій.

Дослідження технологічної сингулярності представлені насамперед працями Р. Курцвейла, який обґрунтував закономірність прискорення технологічного прогресу та можливість досягнення ним порогового стану, після якого характер суспільних змін стає принципово іншим [9]. Н. Бостром розвинув цей напрям через аналіз системних ризиків, пов'язаних із виникненням інтелектуальних систем, можливості яких можуть перевищувати адаптаційні та регуляторні спроможності суспільства [10]. Методологічні засади аналізу нелінійних переходів спираються на праці І. Пригожина, присвячені самоорганізації, нестійкості, флуктуаціям і біфуркаціям у складних системах [11]. Його підхід дозволяє розглядати кризовий стан не лише як відхилення від рівноваги, а як момент вибору між альтернативними траєкторіями подальшого розвитку. Концепція складних адаптивних систем Дж. Голланда доповнює цю логіку аналізом взаємодії множини неоднорідних агентів, зворотних зв'язків, навчання та виникнення системних властивостей, які не можуть бути безпосередньо виведені з характеристик окремих елементів [12].

Суттєвий внесок у дослідження системних криз і невизначеності зробили Н. Талєб, У. Бек, Дж. Тейнтер, Д. Медоуз та її співавтори [13–16]. Н. Талєб розкрив обмеженість прогнозування рідкісних подій із надзвичайно значними наслідками та необхідність формування стійкості до непередбачуваних шоків [13]. У. Бек досліджував суспільне виробництво глобальних ризиків, що супроводжує технологічну модернізацію [14]. Дж. Тейнтер пов'язував занепад складних суспільств зі зниженням граничної віддачі від подальшого інституційного та організаційного ускладнення [15]. Дослідження меж зростання показали, що поєднання демографічного, виробничого, ресурсного та екологічного тиску може формувати системні обмеження довгострокового розвитку [16].

Українська наукова традиція забезпечує конкретизацію глобальних теоретичних підходів відповідно до умов національної економіки. Дослідження Е. Лібанової формують теоретичне та емпіричне підґрунтя демографічного виміру критичної конвергенції. У них розкрито проблеми старіння населення, депопуляції, міграції, людського розвитку, зайнятості та відтворення трудового потенціалу [17; 18]. У працях В. Гейця досліджено макроекономічну динаміку, феномен нестабільності, структурну модернізацію, інституційні трансформації та стратегічні пріоритети розвитку України [19]. А. Гриценко розвинув теорію інституційної архітекτονіки, яка дає змогу аналізувати економічну систему як цілісну структуру взаємопов'язаних інститутів, пропорцій і механізмів координації [20]. Підходи О. Бандури до моделювання економічних циклів, макроекономічної динаміки та прогнозування кризових процесів мають значення для виявлення моментів зміни режимів функціонування економіки [21]. Попередні дослідження інтегрованої та демографічної сингулярності, критичної конвергенції і стійкості соціально-економічних систем сформували безпосереднє теоретичне підґрунтя для розроблення економіко-математичного інструментарію цієї статті [22–25].

Отже, попередні дослідження сформували вагоме підґрунтя для аналізу інноваційного розвитку, технологічного прискорення, ресурсних обмежень, демографічних зрушень, інституційної динаміки, нелінійності та системних ризиків. Невирішеною частиною наукової проблеми залишається розроблення інтегрального інструментарію, який дозволяв би кількісно оцінювати взаємодію базових конвергенцій, визначати наближення системи до критичних порогів, моделювати альтернативні сценарні траєкторії та перевіряти пояснювальну спроможність теорії на прикладах реальних соціально-економічних трансформацій.

Формулювання цілей дослідження (мета статті). Метою дослідження є економіко-математичне обґрунтування основних положень економічної теорії критичної конвергенції шляхом формалізації взаємодії технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій, моделювання їх нелінійного взаємного підсилення, побудови сценарних траєкторій і верифікації пояснювальної та прогностичної спроможності запропонованого інструментарію.

Методологія дослідження ґрунтується на системному, еволюційному, інституційному, синергетичному та сценарному підходах, поєднаних із

методами економіко-математичного моделювання. Системний підхід використано для представлення технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій як взаємопов'язаних складових єдиного трансформаційного процесу. Еволюційний підхід застосовано для дослідження послідовного накопичення змін, формування структурних диспропорцій і переходу системи між різними режимами функціонування. Інституційний підхід використано для оцінювання здатності економічних і політичних інститутів адаптуватися до прискорення технологічних змін, демографічних дисбалансів та ресурсних обмежень. Синергетичний підхід застосовано для пояснення нелінійності, резонансних ефектів і біфуркаційних переходів. У межах дослідження виходимо з положення, що сукупний вплив технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій може перевищувати арифметичну суму їхніх окремих впливів. Економіко-математичне моделювання використано для формалізації основних положень теорії, агрегування різнорідних показників та кількісного оцінювання ступеня наближення соціально-економічної системи до критичного стану. Базовою одиницею кількісного аналізу є інтегральний індекс критичної конвергенції C , нормований у діапазоні від 0 до 1. Його значення формується шляхом поєднання нормованих індексів технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій із урахуванням їх вагового внеску та коефіцієнтів міжфакторної взаємодії. Метод нормування застосовано для приведення різнорідних первинних показників до єдиного безрозмірного діапазону. Пороговий метод використано для інтерпретації значень інтегрального індексу та визначення режимів функціонування соціально-економічної системи. Відповідно до прийнятої в дисертаційному дослідженні шкали, значення індексу нижче 0,4 характеризує відносно стійкий стан; інтервал від 0,4 до 0,7 - накопичення нестійкості; від 0,7 до 0,9 - критичний режим; перевищення рівня 0,9 - резонансний стан, у якому різко зростає ймовірність біфуркаційних змін. Порогові значення виконують не функцію точного передбачення окремої події, а функцію розмежування якісно відмінних станів системи. Сценарний метод застосовано для моделювання альтернативних траєкторій критичної конвергенції.

Виклад основних результатів та їх обґрунтування. Вихідним положенням економічної теорії критичної конвергенції є твердження, що масштабні соціально-економічні трансформації виникають унаслідок не ізольованого розвитку окремих факторів, а їх синхронного наближення до критичних порогів та нелінійного взаємного підсилення. Базовими одиницями аналізу є чотири конвергенції: технологічна, демографічна, ресурсна та інституційна.

Технологічна конвергенція характеризує прискорення розвитку штучного інтелекту, автоматизації, роботизації, цифрових платформ, біотехнологій та інших технологій, швидкість поширення яких може перевищувати адаптаційні можливості суспільства й інститутів. Технологічний розвиток створює нові джерела продуктивності, але водночас змінює структуру зайнятості, розподіл доходів, механізми конкуренції та вимоги до державного регулювання.

Демографічна конвергенція охоплює старіння населення, зниження народжуваності, депопуляцію, міграцію та скорочення пропозиції праці. Її

економічними наслідками є зростання демографічного навантаження, дефіцит трудових ресурсів, зміна структури споживання, посилення тиску на пенсійну систему, охорону здоров'я і державні фінанси. Міграція при цьому розглядається не як окрема конвергенція, а як один із ключових механізмів демографічної динаміки.

Ресурсна конвергенція відображає одночасне загострення обмежень у сферах енергії, води, продовольства, критичних матеріалів та екологічної місткості. Значення має не тільки фізична нестача ресурсів, а й ускладнення доступу до них, територіальна нерівномірність, концентрація ланцюгів постачання та зростання вартості ресурсного забезпечення.

Інституційна конвергенція характеризує накопичення розриву між швидкістю соціально-економічних змін і спроможністю державних, ринкових, фінансових та міжнародних інститутів забезпечувати їх регулювання. Вона виявляється через зниження довіри, фрагментацію правил, ослаблення державної спроможності, боргові дисбаланси, нестабільність ринків і нездатність інститутів своєчасно адаптуватися до нових технологічних, демографічних та ресурсних умов.

Кожна з названих конвергенцій може розвиватися відносно автономно і досягати власного порогового стану. Такий стан доцільно визначати як сингулярний стан окремої конвергенції. Інтегрована сингулярність виникає тоді, коли кілька базових конвергенцій одночасно наближаються до порогів і формують спільну область системної нестійкості. Критична конвергенція є ширшим режимом функціонування соціально-економічної системи, у межах якого синхронізація факторних напружень і резонанс між ними спричиняють якісну зміну траєкторії розвитку.

Логіка переходу до критичної конвергенції відображається такою послідовністю: слабкі сигнали; накопичення факторного напруження; біфуркації; інтегрована сингулярність; критична конвергенція.

Слабкі сигнали є ранніми проявами майбутніх структурних змін. Їх накопичення свідчить про посилення напруження всередині окремих конвергенцій. Біфуркація характеризує момент, коли попередня траєкторія розвитку втрачає стійкість, а система отримує кілька можливих напрямів подальшої еволюції. Інтегрована сингулярність формує порогову область взаємодії конвергенцій, тоді як критична конвергенція відображає режим масштабної трансформації системи.

Для кількісного відображення сукупного трансформаційного напруження використовується інтегральний індекс критичної конвергенції C_t , нормований у діапазоні від 0 до 1. Базова форма індексу поєднує зважені значення чотирьох конвергенцій:

$$C_t^B = w_T T_t + w_D D_t + w_R R_t + w_I I_t \quad (1)$$

де C_t^B — базова складова індексу критичної конвергенції у періоді t ; T_t — індекс технологічної конвергенції; D_t — індекс демографічної конвергенції; R_t — індекс ресурсної конвергенції; I_t — індекс інституційної конвергенції; w_T , w_D , w_R , w_I — вагові коефіцієнти відповідних складових.

Вагові коефіцієнти відповідають умові:

$$w_T + w_D + w_R + w_I = 1 \quad (2)$$

Базова складова відображає накопичений вплив кожної конвергенції, але не враховує можливості їх взаємного посилення. Тому повна модель доповнюється резонансною складовою:

$$C_t = \sum_{i=1}^4 w_i X_{i,t} + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_{i,t} X_{j,t} \quad (3)$$

де $(X_{i,t})$ – нормовані значення технологічної, демографічної, ресурсної та інституційної конвергенцій; β_{it} – коефіцієнти резонансної взаємодії між відповідними конвергенціями.

Перша частина формули характеризує базове накопичення факторного напруження. Друга частина відображає додатковий нелінійний ефект, що виникає за одночасного посилення двох конвергенцій. Якщо технологічна трансформація відбувається в умовах демографічного скорочення, ресурсних обмежень і низької інституційної адаптивності, її наслідки не дорівнюють простій сумі впливів. Виникає резонанс, який прискорює перехід системи до критичного режиму.

У разі необхідності повніша форма моделі може враховувати взаємодію третього порядку:

$$C_t = \sum_{i=1}^4 w_i X_{i,t} + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_{i,t} X_{j,t} + \sum_{i < j < k} \gamma_{ijk} X_{i,t} X_{j,t} X_{k,t} \quad (4)$$

де γ_{itk} характеризує спільний резонанс трьох конвергенцій. Водночас для прикладного оцінювання доцільною є обмежена форма з парними взаємодіями, оскільки вона забезпечує кращу інтерпретованість і знижує ризик надмірної параметризації моделі.

Індекси окремих конвергенцій також є інтегральними величинами:

$$X_{i,t} = \sum_{m=1}^{n_i} a_{im} z_{im,t} \quad (5)$$

де $(z_{im,t})$ – нормоване значення m -го індикатора відповідної конвергенції; a_{im} – його вага; n_i – кількість індикаторів у складі конвергенції.

Нормування дозволяє поєднувати показники, виражені у різних одиницях виміру. Для показників, зростання яких посилює системне напруження, використовується пряме нормування:

$$z_{im,t} = \frac{x_{im,t} - x_{im}^{\min}}{x_{im}^{\max} - x_{im}^{\min}} \quad (6)$$

Для показників, збільшення яких свідчить про покращення стану системи, застосовується обернене нормування:

$$z_{im,t} = \frac{x_{im}^{max} - x_{im,t}}{x_{im}^{max} - x_{im}^{min}} \quad (7)$$

Отже, зростання кожного нормованого індикатора в моделі означає посилення відповідного факторного напруження.

Економічна інтерпретація інтегрального індексу ґрунтується на розмежуванні чотирьох режимів:

Таблиця 1. Порогові стани критичної конвергенції, розробка автора

Значення C_t	Стан системи	Економічна інтерпретація
$0 \leq C_t < 0,4$	Стійкий	Напруження окремих факторів не порушує загальної адаптивності системи
$0,4 \leq C_t < 0,7$	Нестійкий	Накопичуються структурні дисбаланси, зростає чутливість до зовнішніх шоків
$0,7 \leq C_t < 0,9$	Критичний	Взаємодія конвергенцій створює значний ризик біфуркаційної зміни траєкторії
$C_t \geq 0,9$	Резонансний	Система входить у зону інтегрованої сингулярності та масштабної трансформації

Порогові значення не слід трактувати як механічні точки, у яких обов'язково настає конкретна криза. Вони визначають інтервали якісно різних режимів функціонування системи. Перехід через поріг 0,7 означає, що адаптаційних механізмів може бути недостатньо для компенсації зростаючого напруження. Перевищення рівня 0,9 свідчить про високий ступінь синхронізації критичних процесів і можливість швидкої зміни базових економічних та інституційних структур.

Принципово важливим є не лише абсолютне значення індексу, а й швидкість його зміни:

$$\Delta C_t = C_t - C_{t-1} \quad (8)$$

Значне позитивне ΔC_t свідчить про прискорене наближення до критичного порогу. Тому система може становити загрозу навіть за відносно помірною поточною значенням індексу, якщо темп його зростання є високим.

Для оцінювання прискорення використовується друга різниця:

$$\Delta^2 C_t = \Delta C_t - \Delta C_{t-1} \quad (9)$$

Позитивне значення $\Delta^2 C_t$ означає, що зростає не лише рівень конвергенційного напруження, а й швидкість його накопичення. Сукупний аналіз C_t , ΔC_t та $\Delta^2 C_t$ дає змогу перейти від статичної оцінки до раннього виявлення потенційних біфуркацій.

Зростання індексу критичної конвергенції впливає на економічну динаміку через підвищення невизначеності, збільшення трансакційних

витрат, порушення інвестиційних горизонтів, скорочення продуктивної зайнятості, зростання вартості ресурсів і зниження ефективності державного управління.

Узагальнений вплив критичної конвергенції на валовий внутрішній продукт може бути представлений так:

$$GDP_t = GDP_0(1 + g - \delta C_t)^t \quad (10)$$

де GDP_0 — початковий обсяг валового внутрішнього продукту; g — потенційний темп економічного зростання за відсутності критичного конвергенційного впливу; δ — коефіцієнт чутливості економічної динаміки до зростання C_t .

Модель не означає, що технологічна, демографічна, ресурсна та інституційна динаміка завжди має виключно негативний вплив. Технологічні інновації можуть підвищувати продуктивність, міграція — частково компенсувати дефіцит робочої сили, ресурсні обмеження — стимулювати енергоефективність, а інституційні зміни — прискорювати модернізацію. Негативний ефект виникає тоді, коли швидкість і синхронність змін перевищують адаптаційну спроможність системи. Тому коефіцієнт δ відображає не безпосередню «шкідливість» конвергенцій, а втрати, спричинені недостатністю адаптивних механізмів.

Для оцінювання можливих траєкторій критичної конвергенції використовуються три базові сценарії: базовий, прискорений та екстремальний. Їх відмінності визначаються швидкістю зміни окремих конвергенцій, рівнем інституційної адаптації та силою міжфакторного резонансу.

Базовий сценарій передбачає продовження наявних глобальних тенденцій без різкого прискорення критичних процесів. Технологічний розвиток залишається інтенсивним, демографічне старіння поглиблюється, ресурсні обмеження зростають, однак інститути частково пристосовуються до змін. За цим сценарієм інтегральний індекс може досягти приблизно 0,83, а входження у критичний часовий інтервал очікується орієнтовно у 2046–2050 роках.

Прискорений сценарій ґрунтується на швидшому розвитку штучного інтелекту та автоматизації, посиленні демографічних дисбалансів, загостренні конкуренції за критичні ресурси й уповільненій інституційній адаптації. Зростання коефіцієнтів взаємодії призводить до наближення індексу до рівня 0,95. Критичний період у цьому випадку зміщується до 2044–2048 років.

Екстремальний сценарій передбачає синхронне загострення всіх чотирьох конвергенцій, значне ослаблення міжнародних і національних інститутів та формування максимального резонансного ефекту. Розрахункове значення індексу може перевищити одиницю і досягти приблизно 1,05, що свідчить не про порушення логіки індексу, а про вихід системи за межі встановленого критичного діапазону внаслідок резонансної складової. Часове вікно екстремального сценарію оцінюється в межах 2043–2047 років.

Таблиця 2. Сценарні параметри критичної конвергенції, розробка автора

Сценарій	Орієнтовне значення індексу	Часовий інтервал критичної фази	Основна характеристика
Базовий	0,83	2046-2050	Поступове накопичення напружень за часткової адаптації інститутів
Прискорений	0,95	2044-2048	Швидке технологічне прискорення та поглиблення факторних дисбалансів
Екстремальний	1,05	2043-2047	Резонанс критичних станів і максимальний резонанс

Сценарні значення не є точними передбаченнями конкретної дати глобальної кризи. Вони визначають часовий горизонт, у межах якого взаємодія базових конвергенцій може досягти критичної інтенсивності. Відповідно, практична цінність моделі полягає не у встановленні єдиного майбутнього стану, а у виявленні можливого діапазону траєкторій і факторів, здатних прискорити або відтермінувати критичну фазу.

Верифікація економічної теорії критичної конвергенції здійснюється не через твердження, що модель точно передбачає окрему кризу, а шляхом перевірки її здатності пояснювати механізм формування масштабних трансформацій. Для цього аналізуються послідовність слабких сигналів, накопичення факторних напружень, взаємодія кількох конвергенцій, поява резонансного ефекту та перехід системи до нового режиму функціонування.

Пандемія COVID-19 продемонструвала одночасну взаємодію демографічного, технологічного, ресурсного та інституційного вимірів. Медико-демографічний шок спричинив обмеження мобільності та пропозиції праці; технологічна складова виявилася у стрімкій цифровізації; ресурсна — у порушенні логістичних і виробничих ланцюгів; інституційна — у різній спроможності держав реагувати на кризу. Сукупний ефект значно перевищив вплив кожної складової окремо.

Російсько-українська війна також має характер багатовимірного конвергенційного шоку. Вона поєднала демографічні втрати й масштабну міграцію, руйнування ресурсної та енергетичної інфраструктури, прискорення військових технологій, зміну глобальних ланцюгів постачання та кризи міжнародних безпекових інститутів. Війна не є самостійною конвергенцією, однак виступає потужним каталізатором і прискорювачем взаємодії вже наявних факторних напружень. Глобальна енергетична криза показала, що ресурсний шок швидко трансформується у технологічні, соціальні та інституційні зміни. Зростання цін на енергію впливає на інфляцію, промисловість, добробут населення та державні фінанси, водночас прискорюючи розвиток альтернативної енергетики й зміну технологічної структури виробництва. Демографічне старіння розвинених країн є прикладом повільного процесу, що тривалий час може не сприйматися як криза. Проте його поєднання з дефіцитом робочої сили, автоматизацією,

міграційними конфліктами, зростанням соціальних видатків та уповільненням економічного зростання формує довгострокове системне напруження. Прискорений розвиток штучного інтелекту підтверджує положення про нерівномірність технологічної та інституційної динаміки. Технологічні можливості зростають швидше, ніж формуються правові норми, системи освіти, механізми перерозподілу доходів і моделі зайнятості. Саме розрив між швидкістю технологічних змін та адаптаційними можливостями суспільства створює умови для переходу технологічної конвергенції до сингулярного стану.

Проведена верифікація підтверджує, що великі трансформації першої чверті XXI століття мають спільну структурну логіку: вони виникають і посилюються через взаємодію кількох факторних контурів. Це не доводить незмінності конкретних вагових коефіцієнтів чи порогів, але підтверджує доцільність інтегрального аналізу, розмежування базової та резонансної частин індексу й використання сценарного підходу.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження дозволило здійснити економіко-математичне обґрунтування основних положень економічної теорії критичної конвергенції і конкретизувати її пояснювальний і прогностичний інструментарій. По-перше, підтверджено доцільність розгляду великих соціально-економічних трансформацій як результату не ізольованого впливу окремих факторів, а синхронного накопичення технологічних, демографічних, ресурсних та інституційних напружень. Кожна базова конвергенція має власну логіку розвитку та критичні пороги, однак характер системної трансформації визначається насамперед їх взаємодією. По-друге, формалізовано логічну послідовність переходу соціально-економічної системи до критичного режиму: слабкі сигнали – накопичення факторного напруження – біфуркації – інтегрована сингулярність – критична конвергенція. По-третє, обґрунтовано структуру інтегрального індексу критичної конвергенції C_t , який поєднує базову факторну та резонансну складові. Базова складова відображає зважене накопичення технологічного, демографічного, ресурсного та інституційного напружень. Резонансна складова характеризує додатковий нелінійний ефект, унаслідок якого сукупний вплив взаємопов'язаних конвергенцій перевищує арифметичну суму їхніх окремих впливів. По-четверте, запропоновано порогову інтерпретацію інтегрального індексу, яка дозволяє розмежувати стійкий, нестійкий, критичний та резонансний режими функціонування соціально-економічної системи. Значення C_t нижче 0,4 відповідає відносно стійкому стану; інтервал 0,4-0,7 характеризує накопичення нестійкості; 0,7-0,9 – критичне наближення; значення понад 0,9 – резонансний стан. Водночас доведено необхідність урахування не лише абсолютного рівня індексу, а й швидкості та прискорення його зміни. По-п'яте, визначено зв'язок між критичною конвергенцією та макроекономічною динамікою. Негативний економічний ефект створюють не самі технологічні, демографічні, ресурсні чи інституційні зміни, а перевищення швидкістю та синхронністю цих змін адаптаційної спроможності соціально-економічної системи. По-шосте, сценарне моделювання дозволило визначити

альтернативні часові траєкторії критичної конвергенції. За базовим сценарієм інтегральний індекс наближається до рівня 0,83, а критичне часове вікно формується орієнтовно у 2046-2050 роках. Прискорений сценарій передбачає зростання індексу до 0,95 та зміщення критичного періоду до 2044-2048 років. За екстремального сценарію резонансна складова може зумовити перевищення індексом рівня 1,0 і входження системи у критичну фазу в межах 2043-2047 років. По-сьоме, верифікація на прикладах пандемії COVID-19, глобальної енергетичної кризи, російсько-української війни, демографічного старіння і прискореного розвитку штучного інтелекту підтвердила наявність спільної структурної логіки великих трансформацій. У кожному з розглянутих випадків спостерігалися накопичення слабких сигналів, взаємодія кількох факторних контурів, посилення міжсистемних зв'язків та перехід до нового режиму функціонування.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з емпіричним калібруванням індексів окремих конвергенцій, оцінюванням коефіцієнтів β_{it} на основі панельних і часових даних, проведенням розширеного аналізу чутливості та адаптацією моделі до національного і регіонального рівнів. Окремим напрямом є розроблення системи постійного моніторингу слабких сигналів і раннього попередження про наближення соціально-економічних систем до критичних порогових станів.

1. Schumpeter J. A. *Capitalism, Socialism and Democracy*. New York: Harper & Brothers, 1942. 381 p. [pp. 81-86]. URL: <https://archive.org/details/capitalismsocial00schu>
2. Romer P. M. Endogenous Technological Change. *Journal of Political Economy*. 1990. Vol. 98. No. 5, Part 2. P. S71-S102. DOI: <https://doi.org/10.1086/261725>
3. Aghion P., Howitt P. A Model of Growth through Creative Destruction. *Econometrica*. 1992. Vol. 60. No. 2. P. 323-351. DOI: <https://doi.org/10.2307/2951599>
4. Nordhaus W. D. Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*. 2018. Vol. 10. No. 3. P. 333-360. DOI: <https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
5. Nordhaus W. D. Revisiting the Social Cost of Carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2017. Vol. 114. No. 7. P. 1518-1523. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
6. Acemoglu D., Johnson S., Robinson J. A. *Institutions as a Fundamental Cause of Long-Run Growth*. *Handbook of Economic Growth* / ed. by P. Aghion, S. Durlauf. Amsterdam: Elsevier, 2005. Vol. 1A. P. 385-472. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1574-0684\(05\)01006-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0684(05)01006-3)
7. Acemoglu D. Nobel Lecture: Institutions, Technology, and Prosperity. *American Economic Review*. 2025. Vol. 115. No. 6. P. 1709-1748. DOI: <https://doi.org/10.1257/aer.115.6.1709>
8. North D. C. *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 152 p. [pp. 3-10, 83-91]. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808678>
9. Kurzweil R. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. New York: Viking, 2005. 652 p. [pp. 7-14, 35-42, 135-157]. URL: <https://www.simonandschuster.com/books/The-Singularity-Is-Near-Ray-Kurzweil/9780143037880>
10. Bostrom N. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford: Oxford University Press, 2014. 352 p. [pp. 22-36, 95-110, 229-256]. URL: <https://global.oup.com/academic/product/superintelligence-9780198739838>
11. Nicolis G., Prigogine I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York: John Wiley & Sons, 1977. 491 p. [pp. 3-21, 71-98]. URL: <https://archive.org/details/selforganization0000nico>
12. Holland J. H. Studying Complex Adaptive Systems. *Journal of Systems Science and Complexity*. 2006. Vol. 19. No. 1. P. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11424-006-0001-z>

13. Taleb N. N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House, 2007. 366 p. [pp. 1-21, 135-156]. URL: <https://www.penguinrandomhouse.com/books/176226/the-black-swan-by-nassim-nicholas-taleb/>
14. Beck U. *Risk Society: Towards a New Modernity*. London: Sage Publications, 1992. 260 p. [pp. 19-50]. URL: <https://us.sagepub.com/en-us/nam/risk-society/book203184>
15. Tainter J. A. *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 250 p. [pp. 91-126, 194-216]. URL: <https://www.cambridge.org/core/books/collapse-of-complex-societies/0A02AF8A7ABDDC1C5F8BD270D30B5B73>
16. Meadows D. H., Meadows D. L., Randers J., Behrens W. W. *The Limits to Growth*. New York: Universe Books, 1972. 205 p. [pp. 23-45, 124-148]. URL: <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
17. Libanova E. Labour Migration from Ukraine: Key Features, Drivers and Impact. *Economics and Sociology*. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 313-328. DOI: <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2019/12-1/19>
18. Лібанова Е. М. Демографічні втрати України внаслідок війни та міграції. *Демографія та соціальна економіка*. 2023. № 2 (48). С. 3-15. DOI: <https://doi.org/10.15407/dse2023.02.003>
19. Геєць В. М. Феномен нестабільності - виклик економічному розвитку. Київ: Академперіодика, 2020. 456 с. [с. 19-42, 177-208]. URL: <https://ief.org.ua/publication/monohrafiy/>
20. Грищенко А. А. Інституційна архітектура і динаміка економічних перетворень. Харків: Форт, 2008. 928 с. [с. 15-39, 667-704]. URL: <https://ief.org.ua/publication/monohrafiy/>
21. Бандура О. В. Загальна модель економічних циклів - модель кумулятивної неефективності ринків. *Економічна теорія*. 2016. № 1. С. 86-100. URL: <http://etef.org.ua/>
22. Опанасюк В. В. Інтегрована сингулярність як системний економічний феномен: передумови, структура та наслідки. *Актуальні проблеми економіки*. 2025. № 9 (291). С. 76-83. DOI: <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-291-76-83>
23. Опанасюк В. В. Демографічна сингулярність у контексті глобальних соціально-економічних трансформацій. *Наука і техніка сьогодні*. 2026. № 1 (55). С. 723-736. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1\(55\)-723-736](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1(55)-723-736)
24. Опанасюк В. В. Критична конвергенція як категорія економічної теорії великих соціально-економічних трансформацій. *Київський економічний науковий журнал*. 2026. № 13. С. 182-191. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2026-13-23>
25. Opanasiuk V. Sustainable Economic Resilience under Technological, Demographic and Resource Bifurcations. *European Journal of Sustainable Development*. 2026. Vol. 15. No. 2. P. 728-741. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2026.v15n2p728>

-
1. Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, socialism and democracy*. Harper & Brothers. 381 p. (pp. 81-86). <https://archive.org/details/capitalismsocial00schu>
 2. Romer, P. M. (1990). Endogenous technological change. *Journal of Political Economy*, 98(5, Part 2), S71-S102. <https://doi.org/10.1086/261725>
 3. Aghion, P., & Howitt, P. (1992). A model of growth through creative destruction. *Econometrica*, 60(2), 323-351. <https://doi.org/10.2307/2951599>
 4. Nordhaus, W. D. (2018). Projections and uncertainties about climate change in an era of minimal climate policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333-360. <https://doi.org/10.1257/pol.20170046>
 5. Nordhaus, W. D. (2017). Revisiting the social cost of carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7), 1518-1523. <https://doi.org/10.1073/pnas.1609244114>
 6. Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2005). Institutions as a fundamental cause of long-run growth. In P. Aghion & S. Durlauf (Eds.), *Handbook of economic growth* (Vol. 1A, pp. 385-472). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1574-0684\(05\)01006-3](https://doi.org/10.1016/S1574-0684(05)01006-3)
 7. Acemoglu, D. (2025). Nobel lecture: Institutions, technology, and prosperity. *American Economic Review*, 115(6), 1709-1748. <https://doi.org/10.1257/aer.115.6.1709>
 8. North, D. C. (1990). Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge University Press. 152 p. (pp. 3-10, 83-91). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808678>
 9. Kurzweil, R. (2005). *The singularity is near: When humans transcend biology*. Viking. 652 p. (pp. 7-14, 35-42, 135-157). <https://www.simonandschuster.com/books/The-Singularity-Is-Near-Ray-Kurzweil/9780143037880>

10. Bostrom, N. (2014). *Superintelligence: Paths, dangers, strategies*. Oxford University Press. 352 p. (pp. 22–36, 95–110, 229–256). <https://global.oup.com/academic/product/superintelligence-9780198739838>
11. Nicolis, G., & Prigogine, I. (1977). *Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations*. John Wiley & Sons. 491 p. (pp. 3–21, 71–98). <https://archive.org/details/selforganization0000nico>
12. Holland, J. H. (2006). Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11424-006-0001-z>
13. Taleb, N. N. (2007). *The black swan: The impact of the highly improbable*. Random House. 366 p. (pp. 1–21, 135–156). <https://www.penguinrandomhouse.com/books/176226/the-black-swan-by-nassim-nicholas-taleb/>
14. Beck, U. (1992). *Risk society: Towards a new modernity*. Sage Publications. 260 p. (pp. 19–50). <https://us.sagepub.com/en-us/nam/risk-society/book203184>
15. Tainter, J. A. (1988). *The collapse of complex societies*. Cambridge University Press. 250 p. (pp. 91–126, 194–216). <https://www.cambridge.org/core/books/collapse-of-complex-societies/0A02AF8A7ABDDC1C5F8BD270D30B5B73>
16. Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. W. (1972). *The limits to growth*. Universe Books. 205 p. (pp. 23–45, 124–148). <https://www.clubofrome.org/publication/the-limits-to-growth/>
17. Libanova, E. (2019). Labour migration from Ukraine: Key features, drivers and impact. *Economics and Sociology*, 12(1), 313–328. <https://doi.org/10.14254/2071-789X.2019/12-1/19>
18. Libanova, E. M. (2023). Demografichni vtraty Ukrainy vnaslidok viiny ta mihratsii [Demographic losses of Ukraine as a result of war and migration]. *Demohrafiia ta sotsialna ekonomika*, 2(48), 3–15. <https://doi.org/10.15407/dse2023.02.003> (in Ukrainian)
19. Heiets, V. M. (2020). Fenomen nestabilnosti – vyklyk ekonomichnomu rozvytku [The phenomenon of instability as a challenge to economic development]. *Akademperiodyka*. 456 p. (pp. 19–42, 177–208). <https://ief.org.ua/publication/monohrafii/> (in Ukrainian)
20. Hrytsenko, A. A. (2008). Instyutsiina arkhitektonika i dynamika ekonomichnykh peretvoren [Institutional architectures and the dynamics of economic transformations]. *Fort*. 928 p. (pp. 15–39, 667–704). <https://ief.org.ua/publication/monohrafii/> (in Ukrainian)
21. Bandura, O. V. (2016). Zahalna model ekonomichnykh tsykliv – model kumulyativnoi neefektyvnosti rynkiv [A general model of economic cycles: The cumulative market inefficiency model]. *Ekonomichna teoriia*, 1, 86–100. <http://etet.org.ua/> (in Ukrainian)
22. Opanasiuk, V. V. (2025). Intehrovana synhuliarnist yak systemnyi ekonomichnyi fenomen: Peredumovy, struktura ta naslidky [Integrated singularity as a systemic economic phenomenon: Preconditions, structure and consequences]. *Aktualni problemy ekonomiky*, 9(291), 76–83. <https://doi.org/10.32752/1993-6788-2025-1-291-76-83> (in Ukrainian)
23. Opanasiuk, V. V. (2026). Demografichna synhuliarnist u konteksti hlobalnykh sotsialno-ekonomichnykh transformatsii [Demographic singularity in the context of global socioeconomic transformations]. *Nauka i tekhnika sohodni*, 1(55), 723–736. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1\(55\)-723-736](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1(55)-723-736) (in Ukrainian)
24. Opanasiuk, V. V. (2026). Krytychna konverhentsiia yak katehoriia ekonomichnoi teorii velykykh sotsialno-ekonomichnykh transformatsii [Critical convergence as a category of the economic theory of large-scale socioeconomic transformations]. *Kyivskiy ekonomichnyi naukovi zhurnal*, 13, 182–191. <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2026-13-23> (in Ukrainian)
25. Opanasiuk, V. (2026). Sustainable economic resilience under technological, demographic and resource bifurcations. *European Journal of Sustainable Development*, 15(2), 728–741. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2026.v15n2p728>