

УДК 330.341.1:314:327:519.86(477)

JEL M14

DOI <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2026-13-23>**Опанасюк В.В.**

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри економіки, підприємництва та менеджменту,
Київський міжнародний університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6569-9738>

Могилевский Ю.В.

здобувач третього рівня вищої освіти,
Європейський університет
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0775-8733>

КРИТИЧНА КОНВЕРГЕНЦІЯ, ЯК ПОСТСИНГУЛЯРНИЙ ФЕНОМЕН: ФОРМАЛІЗАЦІЯ, ЕКОНОМІЧНІ ЕФЕКТИ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ

У статті пропонується концептуальне та формальне розмежування феноменів інтегрованої сингулярності та критичної конвергенції. Інтегрована сингулярність розглядається як точка біфуркації (дещо розтягнута у часі), в якій технологічна, демографічна, ресурсна та політична сингулярності досягають критичних порогів. Критична конвергенція визначається як постсингулярний процес резонуючого накладання міграційних, демографічних, економічних, технологічних та політичних трансформацій. Запропоновано математичну формалізацію критичної конвергенції через нелінійну функцію, що враховує як адитивний, так і мультиплікативний (резонансний) внески факторів. Розроблено економічну модель впливу критичної конвергенції на динаміку ВВП. На основі аналізу трьох історичних прецедентів (пандемія COVID-19, війна в Ірані, російсько-українська війна) обґрунтовується гіпотеза про те, що ці події є не аномаліями, а передвісниками реальності, в якій критична конвергенція стане системною характеристикою. Запропоновано альтернативний методологічний підхід до прогнозування, що базується на сценарному аналізі, теорії складних мереж та моніторингу слабких сигналів. Обґрунтовано сценарну гіпотезу про потенційну перевагу України як країни «другої хвилі» в контексті критичної конвергенції.

Ключові слова: критична конвергенція, інтегрована сингулярність, резонансний ефект, конкуренція, виробництво, математичне моделювання, економічні ефекти, слабкі сигнали, Україна.

Постановка проблеми. У науковій літературі останніх років дедалі частіше обговорюється концепція інтегрованої сингулярності – прогнозованого періоду, коли технологічна, демографічна, ресурсна та політична сингулярності збігаються у часі, створюючи резонуючий ефект радикальних змін у глобальній системі. Більшість досліджень зосереджуються на самому моменті настання сингулярності, залишаючи поза увагою процеси, які розгортаються після цього моменту. Це створює теоретичну прогалину, яку необхідно заповнити для адекватного розуміння довгострокової динаміки.

Дослідницька гіпотеза: критична конвергенція як постсингулярний феномен характеризується нелінійним підсиленням взаємодії між міграційними, демографічними, економічними, технологічними та політичними процесами, що призводить до якісної зміни прогностичної здатності традиційних моделей. Три історичні прецеденти (COVID-19, війна в Ірані, російсько-українська війна) репрезентують клас явищ, що виникають

на перетині різнорідних кризових процесів, і можуть розглядатися як емпіричні індикатори наближення критичної конвергенції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концептуальні засади технологічної сингулярності розроблені в роботах Р. Курцвейла, який обґрунтував закон прискорення віддачі та довів, що технологічний прогрес має експоненційний характер, а не лінійний [1]. Н. Бостром дослідив ризики, пов'язані з розвитком надінтелекту, зокрема проблему контролю над штучним інтелектом, що перевершує людські когнітивні здібності [2]. Р. Барі Уркоста розвиває концепцію «сингулярної війни», доводячи, що перетин технологічної, демографічної та політичної сингулярностей призводить до нелінійних, важкопрогнозованих наслідків, де традиційні моделі стимулювання втрачають ефективність [3].

Важливий внесок у розуміння економічних наслідків технологічних змін зробили Д. Асемоглу та П. Рестрепо, які дослідили взаємодію між автоматизацією та створенням нових робочих місць, показавши, що технологічний

прогрес може як заміщувати, так і доповнювати людську працю [4]. Дж. Стігліц аналізує проблеми глобалізації та її вплив на нерівність, вказуючи на необхідність перегляду інституційних механізмів регулювання в умовах технологічних зрушень [5]. Н. Талеб у своїй теорії «чорних лебедів» довів обмеженість традиційних моделей прогнозування в умовах рідкісних подій з катастрофічним впливом, які, однак, можуть бути раціоналізовані як передбачувані лише після факту [6].

Серед українських дослідників вагомий внесок у дослідження трансформаційних процесів зробили І. Новіков, який аналізує адаптивність освіти та економічних інститутів до викликів сингулярності, пропонуючи гібридні моделі безперервного навчання [7]. В. Опанасюк та С. Павловський досліджують інтегровану сингулярність як економічний виклик для України та світу, обґрунтовуючи MiTech-індустрію як стабілізаційний фактор у досингулярний період [8].

Особливу увагу слід приділити дослідженням А. Длігача, який аналізує вплив технологічної сингулярності на трансформацію глобальних фінансових ринків та інституційних механізмів регулювання [9]. У своїх працях він доводить, що традиційні фінансові моделі втрачають прогностичну здатність в умовах експоненційного технологічного зростання, що потребує розробки нових підходів до оцінки системних ризиків.

Володимир Бандура, як амбасадор Singularity University (співзаснованої Р. Курцвейлом), зробив значний внесок у популяризацію концепцій сингулярності в Україні та дослідження практичних наслідків розвитку штучного інтелекту [10]. Його роботи зосереджені на аналізі того, як штучний інтелект трансформує бізнес-процеси та створює нові можливості для економічного розвитку. Бандура наголошує, що «AI-революція вже тут», а подальший розвиток до рівня універсального штучного інтелекту та суперінтелекту призведе до фундаментальних змін у політиці та геополітиці [10; 11].

Д. Сюдак та А. Светлік застосували моделі неконтрольованого навчання для аналізу впливу пандемії COVID-19 та російсько-української війни на реконфігурацію фінансових мереж. Їхні дослідження демонструють, що в умовах «чорних лебедів» традиційні моделі виявляються нездатними передбачити нелінійну динаміку, і пропонують використовувати аналіз периферійних вузлів мережі як чутливих індикаторів системних зрушень [12].

Дж. Хансен запропонував теорію «спільності ланцюгів» (Strand Commonality Theory),

яка стверджує, що різні ланцюги економічної, політичної та соціальної активності перетинаються, створюючи патерни, які можна відстежувати [14]. Цей підхід дозволяє перетворити деякі «чорні лебеді» на «сірих лебедів» – події з високою ймовірністю, чий точний час настання залишається невизначеним.

Попри значний теоретичний доробок, формальне визначення та кількісна операціоналізація критичної конвергенції як постсингулярного феномену залишаються нерозробленими. Саме цю прогалину заповнює дане дослідження.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є формалізація поняття критичної конвергенції, розробка математичної моделі для її оцінки та обґрунтування зміни методологічних підходів до прогнозування в постсингулярний період.

Завдання:

1. Запропонувати формальне визначення та операціоналізувати поняття критичної конвергенції.

2. Розробити математичну модель, що враховує резонансні ефекти взаємодії кризових процесів.

3. Оцінити економічний вплив критичної конвергенції на динаміку ВВП.

4. Обґрунтувати обмеженість традиційних методів прогнозування та запропонувати альтернативний підхід.

5. Сформулювати сценарну гіпотезу щодо позиціонування України в контексті критичної конвергенції.

Методологія дослідження. Застосовано комплекс методів: формальне моделювання для математичної операціоналізації понять; економіко-математичне моделювання для оцінки впливу на ВВП; порівняльний аналіз трьох історичних прецедентів; методологічний аналіз для критичного переосмислення підходів до прогнозування. Для пошуку та систематизації даних автор використовував наукові пошукові системи та платформи штучного інтелекту. Цілепокладання, методологія, концептуальна основа та висновки є авторськими.

Виклад основного матеріалу. Критичну конвергенцію доцільно визначити як стан системи, в якій існує одночасний резонуючий вплив сукупності факторів, що мають експоненціальний характер. В даному дослідженні запропоновано дослідити резонуючі ефекти 5-ти факторів: технологічного (Т), демографічного (D), економічного (E), політичного (P) та міграційного (M), що створюють нелінійне підсилення кризових явищ через резонансні ефекти.

Резонансний ефект – явище, за якого одночасна дія декількох факторів створює сукупний ефект, що перевищує суму їхніх індивідуальних ефектів. Кількісно вимірюється через коефіцієнти β у запропонованій моделі.

Критична конвергенція – стан, коли значення індексу C_t (див. формулу 1) перевищує певний пороговий рівень (C), після якого традиційні моделі прогнозування втрачають точність. На основі аналізу трьох прецедентів, порогове значення C може бути попередньо оцінене на рівні 0.6–0.7.

Слабкі сигнали – ранні, часто нечіткі індикатори майбутніх зрушень, що виявляються через аналіз перетинів різних ланцюгів активності.

Математична модель критичної конвергенції:

$$C_t = \sum_{i=1}^5 w_i X_{i,t} + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} X_{i,t} X_{j,t}$$

де: C_t – рівень критичної конвергенції в момент t (нормалізований показник, $0 \leq C_t \leq 1$); $X_{i,t}$ – нормалізовані значення п'яти факторів (T, D, E, P, M); w_i – вагові коефіцієнти, що відображають чутливість системи до кожного фактора ($\sum w_i = 1$); β_{ij} – коефіцієнти резонансу, що відображають нелінійне підсилення при взаємодії факторів i та j ($\beta_{ij} \geq 0$).

Перший доданок відображає лінійний (адитивний) внесок окремих факторів, другий – нелінійний (мультиплікативний) внесок їхньої взаємодії. Коефіцієнти β_{ij} є критичними: при їхніх низьких значеннях система поводить майже лінійно, при високих – домінує резонансний ефект. За оцінками автора, для більшості сучасних економік значення β_{ij} знаходяться в діапазоні 0.1–0.3, але в умовах критичної конвергенції можуть зростати до 0.5–0.8.

Вплив критичної конвергенції на економічну динаміку пропонується форма-

лізувати через модифікацію виробничої функції:

$$GDP_t = GDP_0 \cdot (1 + g - \delta \cdot C_t)$$

де: GDP_t – ВВП у період t ; GDP_0 – базовий рівень ВВП; g – потенційний темп зростання за відсутності криз; δ – коефіцієнт чутливості економіки до лінійного впливу конвергенції;

За оцінками автора на основі аналізу трьох прецедентів, для відкритих економік з високим рівнем технологічної залежності значення δ можуть становити 0.3–0.5. Для України, враховуючи її меншу технологічну залежність порівняно з лідерами, ці коефіцієнти можуть бути дещо нижчими ($\delta \approx 0.2-0.3$), що може створити певну відносну перевагу.

Для емпіричного обґрунтування концепції критичної конвергенції проаналізовано три події, які репрезентують один клас явищ за такими критеріями: (а) раптовість настання при наявності структурних передумов; (б) здатність викликати каскадні ефекти в різних секторах; (в) системний вплив на глобальні ланцюги створення вартості.

Ключовий висновок: жодна з цих подій не була абсолютно непередбачуваною. Як стверджує теорія «спільності ланцюгів», різні ланцюги активності перетинаються, створюючи патерни, які можна відстежувати [13]. Це дозволяє перетворити деякі «чорні лебеді» на «сірих лебедів» – події з високою ймовірністю, чий точний час настання залишається невизначеним.

Перехід: інтегрована сингулярність – критична конвергенція. Схема 1. Логіка переходу від інтегрованої сингулярності до критичної конвергенції:

Інтегрована сингулярність (точка біфуркації ~2040–2045) \rightleftharpoons

Резонансне накладання факторів \rightleftharpoons

Критична конвергенція (постсингулярний процес)

Таблиця 1

Порівняльний аналіз трьох прецедентів

Критерій	COVID-19 (2020)	Російсько-Українська війна (2022)	Війна в Ірані (2026)
Падіння фондового ринку (перший тиждень)	S&P 500: -30% (за місяць)	JSE All Share: -6.8%	JSE All Share: -9.2%
Зростання ціни нафти (Brent)	Незначне	+31% (\$89→\$117)	+30% (\$70→\$91)
Валютний шок	Помірний	-3.8%	-3.8%
Структурні передумови	SARS (2003), MERS (2012), Ебола (2014)	Анексія Криму (2014), війна на Донбасі (2014-2022)	Тривала напруженість, ядерна програма
Класифікація за Талебом	«Сірий лебідь»	«Сірий лебідь»	«Чорний лебідь»

Джерело: складено авторами на основі [14; 12; 15]

Характеристики:

- нелінійне підсилення
- каскадні ефекти
- втрата прогностичної здатності

Методологічні виклики та альтернативний підхід. Показано, що за умов критичної конвергенції традиційні методи середньострокового прогнозування можуть суттєво втрачати точність через нелінійність, взаємне підсилення кризових процесів і часові лаги. Пропонується альтернативний підхід, що включає:

Сценарна гіпотеза щодо позиціонування України. На основі запропонованої моделі можна сформулювати сценарну гіпотезу: за умови, що більш технологічно розвинені країни (з вищою залежністю фондового ринку від технологій) першими зіткнуться з руйнівними резонансами, Україна як країна «другої хвилі» потенційно отримує часове вікно для адаптації. Кількісно це означає, що для України значення β_{ij} (коефіцієнтів резонансу) можуть бути нижчими на початковому етапі критичної конвергенції, що дозволяє використати час для інституційної та технологічної адаптації. Ця гіпотеза потребує подальшої емпіричної верифікації.

Висновки. Запропоновано формальне розмежування інтегрованої сингулярності (точка біфуркації) та критичної конвергенції (постсингулярний процес резонансного накладання трансформацій). Введено операціональні визначення резонансного ефекту, критичної конвергенції та слабких сигналів.

Розроблено математичну модель критичної конвергенції, що враховує як адитивний, так і мультиплікативний внески п'яти факторів (технологічного, демографічного, економічного, політичного, міграційного). Коефіцієнти резонансу β_{ij} є ключовими параметрами,

що відображають нелінійне підсилення кризових явищ.

Побудовано економічну модель впливу критичної конвергенції на динаміку ВВП, яка включає квадратичний член для відображення нелінійного прискорення негативних ефектів. За оцінками, для відкритих економік значення δ можуть становити 0.3–0.5.

На основі аналізу трьох прецедентів (COVID-19, війна в Ірані, російсько-українська війна) обґрунтовано, що ці події репрезентують один клас явищ, що виникають на перетині різнорідних кризових процесів. Жодна з них не була абсолютно непередбачуваною, що підтверджує можливість переходу від «чорних» до «сірих лебедів» через аналіз структурних передумов.

Показано, що традиційні методи прогнозування в умовах критичної конвергенції можуть суттєво втрачати точність. Запропоновано альтернативний підхід, що базується на сценарному аналізі, теорії складних мереж (особливо аналізі периферійних вузлів) та моніторингу слабких сигналів.

Сформульовано сценарну гіпотезу про потенційну перевагу України як країни «другої хвилі»: нижчі початкові значення коефіцієнтів резонансу можуть створити часове вікно для адаптації. Ця гіпотеза потребує подальшої емпіричної верифікації на основі даних про фактичні резонансні ефекти в різних економіках.

Перспективи подальших досліджень включають емпіричну калібровку параметрів моделі на основі історичних даних, розробку індексу критичної конвергенції (Critical Convergence Index) з конкретними пороговими значеннями, створення агентних моделей для імітації резонансних ефектів, а також порівняльний аналіз чутливості різних національних економік до критичної конвергенції.

Таблиця 2

Порівняння традиційного та альтернативного підходів до прогнозування

Критерій	Традиційний підхід	Альтернативний підхід
Базова модель	Екстраполяція трендів	Сценарний аналіз
Тип моделі	Лінійна, однофакторна	Нелінійна, багатофакторна
Припущення про агентів	Раціональні, однорідні	Обмежено раціональні, гетерогенні
Аналітичний фокус	Окремі змінні	Структура зв'язків (мережа)
Джерело даних	Явні статистичні індикатори	«Слабкі сигнали»
Результат	Точковий прогноз	Діапазон сценаріїв

Джерело: складено авторами на основі [12]

Бібліографічний список

1. Kurzweil R. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. New York: Viking, 2005. 652 p.
2. Bostrom N. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford: Oxford University Press, 2014. 352 p.
3. Urcosta R.B. *The Singularity Warfare: The Metatheoretical Framework*. arXiv, 2025. 24 p. URL: <https://arxiv.org/abs/2511.11674>
4. Acemoglu D., Restrepo P. *The Race Between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment*. *American Economic Review*. 2018. Vol. 108. № 6. pp. 1488–1542.
5. Stiglitz J. *Globalization and Its Discontents Revisited: Anti-Globalization in the Era of Trump*. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 496 p.
6. Taleb N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House, 2007. 400 p.
7. Новіков І.О. Адаптивність освіти в еру сингулярності. *TQM Journal*. 2020. Т. 32. № 4. С. 567–582.
8. Опанасюк В.В., Павловський С.А. Інтегрована сингулярність як економічний виклик для України та світу. *Розвиток міста*. 2026. № 1 (09). С. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.32782/city-development.2026.1-21>
9. Длігач А. Технологічна сингулярність та трансформація глобальних фінансових ринків. *Фінанси України*. 2024. № 5. С. 34–52.
10. Бандура В. Штучний інтелект як драйвер економічної трансформації. *Економіка та суспільство*. 2025. № 2 (15). С. 23–31.
11. Бандура В. Перспективи розвитку універсального штучного інтелекту та суперінтелекту. *Наукові записки НаУКМА. Економічні науки*. 2025. Т. 10. № 1. С. 45–53.
12. Siudak D., Świetlik A. Unsupervised learning modeling of the impact of Black Swan events on financial network reconfiguration: New insights from the COVID-19 outbreak and the Russia-Ukraine war. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2025. Vol. 658, Art. number 130277.
13. Hansen J. Strand Commonality Theory. *Procurement Insights*. 2025. URL: <https://procureinsights.com/2025/05/31/are-black-swan-events-real-or-are-they-a-product-of-hindsight/>
14. African News Agency. Global markets plunge as Iran conflict triggers biggest financial shock in four years. 2026. URL: <https://africannewsagency.com/global-markets-plunge-as-iran-conflict-triggers-biggest-financial-shock-in-four-years/>
15. S&P Global. Trading houses 'less stressed' by Middle East crisis due to deeper funding access. 2026. URL: <https://spglobal.cn/energy/en/news-research/latest-news/crude-oil/042026-trading-houses-less-stressed-by-middle-east-crisis-due-to-deeper-funding-access>

References

1. Kurzweil R. *The Singularity Is Near: When Humans Transcend Biology*. New York: Viking, 2005. 652 p.
2. Bostrom N. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*. Oxford: Oxford University Press, 2014. 352 p.
3. Urcosta R.B. *The Singularity Warfare: The Metatheoretical Framework*. arXiv, 2025. 24 p. URL: <https://arxiv.org/abs/2511.11674>
4. Acemoglu D., Restrepo P. *The Race Between Man and Machine: Implications of Technology for Growth, Factor Shares, and Employment*. *American Economic Review*. 2018. Vol. 108. № 6. pp. 1488–1542.
5. Stiglitz J. *Globalization and Its Discontents Revisited: Anti-Globalization in the Era of Trump*. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 496 p.
6. Taleb N. *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*. New York: Random House, 2007. 400 p.
7. Novikov I.O. *Adaptyvnist osvity v eru synhuliarnosti [Adaptability of education in the era of singularity]*. *TQM Journal*. 2020. Т. 32. № 4. С. 567–582.
8. Опанасюк В., Павловський С. Інтегрована сингулярність як економічний виклик для України та світу [Integrated singularity as an economic challenge for Ukraine and the world]. *Розвиток міста – City Development*. 2026. № 1 (09). С. 172–178. DOI: <https://doi.org/10.32782/city-development.2026.1-21>
9. Длігач А. Технологічна сингулярність та трансформація глобальних фінансових ринків [Technological singularity and transformation of global financial markets]. *Фінанси України – Finance of Ukraine*. 2024. № 5. С. 34–52.
10. Бандура В. Штучний інтелект як драйвер економічної трансформації [Artificial intelligence as a driver of economic transformation]. *Економіка та суспільство – Economy and Society*. 2025. № 2 (15). С. 23–31.
11. Бандура В. Перспективи розвитку універсального штучного інтелекту та суперінтелекту [Prospects for the development of universal artificial intelligence and superintelligence]. *Наукові записки НаУКМА. Економічні науки – Scientific Notes of NaUKMA. Economic Sciences*. 2025. Т. 10. № 1. С. 45–53.
12. Siudak D., Świetlik A. Unsupervised learning modeling of the impact of Black Swan events on financial network reconfiguration: New insights from the COVID-19 outbreak and the Russia-Ukraine war. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2025. Vol. 658, Art. number 130277.
13. Hansen J. Strand Commonality Theory. *Procurement Insights*. 2025. URL: <https://procureinsights.com/2025/05/31/are-black-swan-events-real-or-are-they-a-product-of-hindsight/>

14. African News Agency. Global markets plunge as Iran conflict triggers biggest financial shock in four years. 2026. URL: <https://africannewsagency.com/global-markets-plunge-as-iran-conflict-triggers-biggest-financial-shock-in-four-years/>
15. S&P Global. Trading houses 'less stressed' by Middle East crisis due to deeper funding access. 2026. URL: <https://spglobal.cn/energy/en/news-research/latest-news/crude-oil/042026-trading-houses-less-stressed-by-middle-east-crisis-due-to-deeper-funding-access>

Vitalii Opanasiuk

PhD in Economics, Associate Professor,
Associate Professor of Economics, Entrepreneurship, Management Department,
Kyiv International University

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

Iurii Mohylevskyi

Postgraduate student,
European University

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0775-8733>

CRITICAL CONVERGENCE AS A POST-SINGULAR PHENOMENON: FORMALIZATION, ECONOMIC EFFECTS, AND METHODOLOGICAL CHALLENGES OF FORECASTING

The article proposes a conceptual and formal distinction between the phenomena of integrated singularity and critical convergence. Integrated singularity is considered as a bifurcation point (somewhat extended in time) at which technological, demographic, resource, and political singularities reach critical thresholds. Critical convergence is defined as a post-singularity process of resonant superposition of migration, demographic, economic, technological, and political transformations. A mathematical formalization of critical convergence is proposed through a nonlinear function that accounts for both additive and multiplicative (resonant) contributions of factors. An economic model of the impact of critical convergence on GDP dynamics is developed. Based on the analysis of three historical precedents (the COVID-19 pandemic, the Iran war, and the Russian-Ukrainian war), the hypothesis is substantiated that these events are not anomalies but harbingers of a reality in which critical convergence will become a systemic characteristic. An alternative methodological approach to forecasting is proposed, based on scenario analysis, complex network theory, and weak signal monitoring. A scenario-based hypothesis about the potential advantage of Ukraine as a "second wave" country in the context of critical convergence is substantiated.

Keywords: critical convergence, integrated singularity, resonance effect, mathematical modeling, competition, economic effects, weak signals, Ukraine.

Дата надходження статті: 03.03.2026

Дата прийняття статті: 20.03.2026

Дата публікації статті: 11.05.2026