

Роговий А. І., Ахієзер О. Б., Решетнікова С. М., Колбасін В. О., Пахомов Ю. В.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ІННОВАЦІЙНО-ІНЖИНІРИНГОВИХ КЛАСТЕРІВ

У сучасних умовах цифровізації та розвитку економіки знань інноваційно-інжинірингові кластери трансформуються в складні динамічні системи з високим рівнем невизначеності та багатофакторних взаємодій і значною залежністю від зовнішніх управлінських впливів. Традиційні економіко-математичні підходи не забезпечують достатньої гнучкості для моделювання таких систем, що зумовлює необхідність упровадження інтегрованих методів штучного інтелекту. **Мета дослідження** – розробити й апробувати гібридну модель формування інноваційно-інжинірингових кластерів, яка поєднує методи машинного навчання, графового аналізу, агентно орієнтованого моделювання й цифрових двійників, з подальшим оцінюванням синергетичного ефекту їх функціонування й аналізом впливу управлінських факторів на динаміку розвитку кластерів. У роботі використано багаторівневий підхід, що передбачає кластеризацію агентів (*k-means*, DBSCAN), побудову графової моделі взаємодій, застосування графових нейронних мереж для врахування топологічних залежностей, а також агентно орієнтованого моделювання для дослідження еволюції системи в часі. Додатково впроваджено функції сумісності агентів і ризику, що дають змогу формалізувати синергетичний ефект і стійкість кластера в межах оптимізаційної постановки. Усі компоненти інтегруються у вигляді цифрового двійника, що забезпечує можливість сценарного аналізу. **Результати дослідження.** Модель апробовано на змодельованому регіональному кластері, що охоплює підприємства, університети, інвесторів і державний орган. Результати симуляції продемонстрували, що державна підтримка суттєво підвищує інноваційну активність учасників кластера, збільшує щільність мережевих зв'язків і кількість коопераційних проєктів. Виявлено ключові вузли мережевої взаємодії, зокрема значення університетів як центрів трансферу знань та інвесторів, як фінансових хабів. **Висновки.** Результати дослідження підтверджують ефективність запропонованого підходу та його придатність для прогнозування розвитку інноваційних екосистем і підтримки прийняття стратегічних управлінських рішень. Розроблена модель забезпечує комплексне поєднання методів машинного навчання, графового аналізу, агентного моделювання й цифрових двійників, що дає змогу перейти від статичного аналізу кластерів до їх адаптивного й прогностичного управління. **Практична цінність** дослідження полягає в можливості використання запропонованого підходу для підтримки регіональної інноваційної політики, оцінювання ефективності управлінських рішень і формування стійких інноваційно-інжинірингових екосистем.

Ключові слова: інноваційно-інжинірингові кластери; штучний інтелект; машинне навчання; графовий аналіз; графові нейронні мережі; агентно орієнтоване моделювання; цифровий двійник.

Вступ

Сучасна економіка знань розвивається в умовах глобалізації, цифровізації та швидкого поширення технологічних інновацій. Виробничі й економічні системи стають дедалі складнішими та вимагають нових підходів до аналізу, планування й управління. Якщо раніше наголошувалася на економіко-математичних моделях кластеризації, то нині дедалі більшої ваги набувають методи комп'ютерних наук – від алгоритмів машинного навчання до мультиагентних симуляцій і цифрових двійників. Це зумовлено стрімким зростанням обсягів інформації, необхідністю аналізувати багатофакторні взаємодії та потребою в інструментах, здатних підтримувати прийняття рішень у реальному часі.

Промислові кластери, що є сукупністю взаємопов'язаних підприємств, інституцій,

дослідницьких центрів і державних структур, у сучасних умовах трансформуються в складні кіберфізичні системи. Така трансформація супроводжується інтеграцією інтернету речей (IoT), великих даних (*Big Data*), штучного інтелекту (AI) і технологій хмарних обчислень. У цьому контексті кластери можуть розглядатися як динамічні мережі, що визначаються нелінійними взаємозв'язками, високим ступенем невизначеності та необхідністю швидкої адаптації до змін зовнішнього середовища.

Останнім часом зростає інтерес до використання графових моделей, які дають змогу формалізувати структуру кластерів через систему вузлів (підприємства, університети, органи влади, інвестори) та ребер (партнерські відносини, трансфер технологій, фінансові потоки). Водночас агентно орієнтовані моделі (ABM) створюють умови для моделювання поведінки окремих учасників кластера й дослідження того,

як локальні взаємодії призводять до макроскопічних ефектів. Ще одним перспективним напрямом є застосування цифрових двійників (*Digital Twins*), які допомагають відтворювати функціонування промислових кластерів у кіберпросторі, проводити симуляції *what-if* і розробляти сценарії стратегічного розвитку.

У сучасній економіці знань інноваційно-інжинірингові кластери трансформуються в складні кіберфізичні системи, що визначаються нелінійними взаємодіями, високою динамічністю та невизначеністю. Традиційні економіко-математичні підходи не дають змоги адекватно моделювати такі системи, особливо в умовах великих даних і багаторівневих взаємозв'язків.

У зв'язку з цим актуальним є застосування гібридних моделей, що інтегрують:

- методи машинного навчання;
- графовий аналіз;
- агентно орієнтоване моделювання (*Agent-Based Modeling*, ABM), яке дає змогу описувати автономну поведінку й адаптивну взаємодію учасників кластера;
- цифрові двійники (*Digital Twin*).

Однак наявні підходи здебільшого розглядають ці компоненти ізольовано, що обмежує їх здатність до комплексного аналізу й прогнозування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика формування інноваційних кластерів набула значної уваги в сучасній науковій літературі. У роботі [1] запропоновано алгоритмічне визначення "кластерів споріднених індустрій" на основі ко-локалізації та економічних зв'язків, що продемонструвало прямий зв'язок між функціонуванням кластерів і зростанням зайнятості та рівнем патентування. Автори дослідження [2] проаналізували застосування графових методів для виявлення ієрархічних структур у міжнародній торгівлі та підтвердили ефективність спектральної кластеризації для виділення стійких промислових спільнот. Подібні висновки отримано, зокрема, у праці [3], де на основі бази WIOD автори продемонстрували стійкість виявлених індустріальних кластерів до шуму та зміни даних. Дослідження [4] присвячено визначенню "ключових секторів" у глобальних мережах торгівлі способом аналізу центральностей, що сприяло оцінюванню системної вразливості економічних структур. У роботі [5] доведено, що спільноти можуть бути відновлені навіть

без явних зв'язків, лише на основі часових слідів активності, що відкриває нові перспективи для аналізу транзакційних та інформаційних даних.

Окремий напрям досліджень становлять агентно орієнтовані моделі (ABM). Так, автори [6] розробили модель виникнення високотехнологічних кластерів, у якій локальні взаємодії фірм породжують макроекономічні ефекти концентрації. У дослідженні [7] описано вивчення процесу дифузії технологічних інновацій у китайських регіонах і виявлено порогові ефекти, пов'язані з масштабом мережі та швидкістю обміну знаннями. Автори праці [8] продемонстрували роль контрактів у розвитку індустріального симбіозу, що забезпечує стабільність виробничих обмінів. Аналогічно в роботі [9] застосовано ABM для аналізу формування міжфірмової довіри й знанневих потоків у кластерах. У наступних дослідженнях, зокрема [10], інтегровано агентні моделі з внутрішньофірмовим *input-output*-аналізом, доведено доцільність їх використання для оцінювання компромісів між економічними й екологічними цілями, тоді як автори роботи [11] наголошують на значенні поведінкових факторів у робастності симбіозних мереж.

Як продемонстрував аналіз сучасних досліджень, агентно орієнтоване моделювання є особливо ефективним для опису складних соціально-економічних систем, у яких учасники мають автономну поведінку, власні цілі та здатні адаптуватися до змін середовища. Саме тому використання агентного підходу є доцільним для дослідження інноваційно-інжинірингових кластерів.

Важливим доповненням до агентних моделей стають цифрові двійники (*Digital Twin*, DT). Так, наприклад, у роботі [12] запропоновано концепцію *Digital Twin Learning Ecosystem* для традиційних виробничих систем, що поєднує моніторинг, навчання й оптимізацію. Автори [13] реалізували мультиагентну систему з цифровим двійником для децентралізованого диспетчерування на виробничій фабриці, що сприяло зростанню ефективності прийняття рішень. У праці [14] запропоновано платформу DT для індустріальних парків із функціями моніторингу енергоспоживання й оцінювання сценаріїв зменшення CO₂. На концептуальному рівні автори статті [15] підтвердили, що використання динамічних знанневих графів узгоджується з архітектурою універсального цифрового двійника, спрощуючи інтеграцію даних у промислових системах.

На окрему увагу заслугоує застосування методів графових нейронних мереж (*Graph Neural Networks*, GNN). Так, наприклад, у роботі [16] продемонстровано переваги GNN у прогнозуванні двосторонніх торгових потоків порівняно з класичними гравітаційними моделями. Автори ж статті [17] поєднали знаннєві графи з нейросимвольним навчанням для виявлення ризиків у глобальних ланцюгах постачання. У дослідженні [18] розроблено ієрархічну GNN для оцінювання ризиків у ланцюгах постачання, яка перевершила традиційні алгоритми на реальних даних.

У роботі [19] розглянуто застосування інтелектуальних методів аналізу даних для дослідження складних соціально-економічних систем, зокрема із використанням підходів машинного навчання й мережевого аналізу. Автори приділяють увагу інтеграції структурних і поведінкових властивостей систем, що дає змогу підвищити точність моделювання взаємодій між елементами. Досягнуті результати підтверджують ефективність упровадження гібридних AI-підходів для аналізу динамічних систем, що узгоджується з напрямом дослідження, запропонованим у цій роботі.

Отже, сучасні розвідки демонструють перехід від класичних економіко-математичних моделей до комплексних підходів, що поєднують графову теорію, агентні моделі й цифрові двійники. Це свідчить про високу актуальність наступних робіт у галузі комп'ютерних наук, які дають змогу створювати інтегровані системи прогнозування, моніторингу й управління розвитком інноваційних кластерів.

Мета й завдання публікації

Метою дослідження є розроблення й формалізація моделі нейромережевого планування переміщення кіберфізичної системи на основі принципів аферентного синтезу, що забезпечує інтеграцію сенсорної інформації, формування оптимального напрямку руху й адаптивне функціонування в умовах невизначеного й динамічного зовнішнього середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1) проаналізувати підходи до формування інформації про зовнішнє середовище КФС на основі даних системи технічного зору;

2) запропонувати спосіб подання зовнішнього середовища у вигляді дискретної моделі, придатної для нейромережевого оброблення;

3) сформулювати задачу планування переміщення КФС у формалізованому вигляді;

4) розробити нейромережеву структуру для інтеграції сенсорних показників і визначення напрямку руху;

5) описати принцип функціонування нейромережевого планувальника в процесі керування переміщенням кіберфізичної системи.

Мета дослідження

Метою є розроблення й апробування гібридної моделі формування інноваційно-інжинірингових кластерів, що поєднує методи машинного навчання, графового аналізу, агентно орієнтованого моделювання та цифрових двійників, з подальшим оцінюванням синергетичного ефекту їх функціонування й аналізом впливу управлінських і політичних факторів на динаміку розвитку кластерів.

Матеріали й методи дослідження

Для побудови гібридної моделі інноваційно-інжинірингового кластера впроваджено багаторівневий методологічний підхід, що поєднує методи машинного навчання, аналізу графів, агентного моделювання й цифрових двійників.

Розроблений підхід можна умовно подати у вигляді послідовності кількох етапів.

1) Збір і підготовка інформації: формування інтегрованої бази показників підприємств, університетів, інвесторів і державних інституцій; нормалізація та очищення даних.

2) Кластеризація та факторний аналіз: застосування алгоритмів машинного навчання (*k-means*, DBSCAN, ієрархічні методи, *spectral clustering*) для виділення стійких угруповань підприємств; використання PCA та *autoencoders* з метою скорочення розмірності.

3) Графове моделювання: побудова мережевої моделі кластера, де вузли позначають учасників, а ребра – зв'язки між ними; визначення центральних вузлів і підкластерів.

4) Агентне моделювання (ABM): створення симуляції взаємодії між підприємствами, університетами, інвесторами й державою для аналізу динаміки кластера в часі.

5) Інтеграція та сценарне моделювання кластера: об'єднання результатів кластеризації, групового аналізу й агентного моделювання в єдину інтегровану модель інноваційно-інжинірингового кластера.

6) Візуалізація та прийняття рішень: подання результатів у вигляді інтерактивних графів, таблиць і панелей для підтримки стратегічного управління.

Запропонований підхід відтворює послідовність кроків від збору даних до створення цифрового двійника, який слугує інтегрованим інструментом для оцінювання та прогнозування розвитку кластера.

У роботі використовується агентно орієнтований підхід до моделювання інноваційно-інжинірингових кластерів. На відміну від класичного об'єктного подання, де елементи системи переважно описуються як пасивні структури даних із фіксованими властивостями, агентний підхід дає змогу моделювати автономну поведінку учасників системи, їх адаптацію до змін середовища, прийняття рішень і динамічну взаємодію між собою.

У межах дослідження агентами є підприємства, університети, інвестори й державні органи, які здатні змінювати свою поведінку залежно від зовнішніх факторів, доступних ресурсів, рівня кооперації та управлінських впливів. Такий підхід дає змогу перейти від статичного опису структури кластера до моделювання процесів його розвитку в часі.

Використання агентного моделювання забезпечує вивчення впливів, коли глобальна поведінка кластера формується внаслідок локальних взаємодій окремих учасників. Це є особливо важливим для інноваційних екосистем, де результати їх функціонування значною мірою визначаються кооперацією, конкуренцією та адаптивністю учасників.

Інноваційно-інжиніринговий кластер у роботі розглядається як складна динамічна система, що містить множину автономних елементів моделі (агентів – підприємств, університетів, інвесторів, державних органів), взаємодія між якими визначає рівень інноваційної активності та синергетичного ефекту.

Структура кластера формалізується у вигляді зваженого графа:

$$G = (V, E, W),$$

де $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множина агентів (підприємства, університети, інвестори); $E \subseteq V \times V$ – множина зв'язків;

$W = \{w_{ij}\}$ – ваги зв'язків (інтенсивність співпраці).

Такий граф задає структурну основу кластера, на якій будуються подальші аналітичні та імітаційні процедури.

Кожний агент $v_i \in V$ описується вектором характеристик:

$$v_i = \{r_i, c_i, p_i, h_i\},$$

де r_i – інтенсивність інвестицій у R&D; c_i – рівень коопераційної активності; p_i – кількість спільних проєктів; h_i – кадровий потенціал.

Цей вектор формує простір станів системи, який використовується в задачах кластеризації, графовому аналізі та динамічному моделюванні.

Ключовою характеристикою ефективності кластера є синергетичний ефект, що виникає внаслідок взаємодії агентів. Його визначаємо таким чином:

$$S(G) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot \varphi(x_i, x_j),$$

де w_{ij} – інтенсивність взаємодії між агентами i та j ; $\varphi(x_i, x_j)$ – функція сумісності агентів.

Функцію $\varphi(x_i, x_j)$ долучаємо для кількісної оцінки взаємодії між агентами:

$$\varphi(x_i, x_j) = \alpha \cdot \text{sim}(x_i, x_j) + \beta \cdot \text{comp}(x_i, x_j),$$

де $\text{sim}(x_i, x_j)$ – міра подібності агентів; $\text{comp}(x_i, x_j)$ – міра компліментарності;

$$\alpha, \beta \in [0, 1], \quad \alpha + \beta = 1.$$

Показник міри подібності відбиває схожість стратегій розвитку агентів. Для його розрахунку використовуємо косинусну подібність:

$$\text{sim}(x_i, x_j) = \frac{x_i \cdot x_j}{|x_i| \cdot |x_j|}.$$

Компліментарність визначається як різниця інноваційних характеристик і дає змогу зважати на ефект доповнюваності (наприклад, стартап + великий бізнес):

$$\text{comp}(x_i, x_j) = 1 - \frac{|r_i - r_j|}{\max(r)},$$

де r_i, r_j – інвестиції в R&D; $\max(r)$ – максимальне значення у вибірці.

Отже, $S(G)$ позначає інтегральний ефект функціонування кластера. Для оцінювання стійкості кластера додано функцію ризиків $R(G)$, яка має такий вигляд:

$$R(G) = \gamma \cdot (1 - D(G)) + \delta \cdot F(G),$$

де $D(G) = \frac{2|E|}{|V|(|V|-1)}$ – щільність графа (низька щільність означає слабку взаємодію і, як наслідок, високий ризик); $F(G) = 1 - |C_{\max}|/|V|$ – фрагментація мережі; C_{\max} – найбільша зв'язана компонента.

Щоб взяти до уваги складну топологію мережі та нелінійні залежності, впроваджується модель графових нейронних мереж (GNN):

$$h_i^{(k+1)} = \sigma \left(\sum_{j \in N(i)} w_{ij} \cdot W^k h_j^k \right),$$

де h_j^k – подання агента на k -му шарі; $N(i)$ – множина сусідніх агентів; W^k – параметри моделі; σ – нелінійна функція активації.

GNN дає змогу зважати на мережеві ефекти, покращити ролі агентів у кластері.

Еволюція кластера в часі описується як дискретний динамічний процес:

$$x_i(t+1) = f(x_i(t), N_i(t), u(t)),$$

де f – функція, що описує формування нових зв'язків, зміну рівня інноваційності, адаптацію агентів до зовнішніх умов; $x_i(t)$ – стан агента в момент часу t ; $N_i(t)$ – сусідні агенти; $u(t)$ – керівні впливи (державна політика, інвестиції).

Формування ефективного кластера розглядається як задача оптимізації:

$$\max_G \left(\sum_{i,j} w_{ij} \cdot \varphi(x_i, x_j) \right) - \lambda R(G),$$

де λ – коефіцієнт, що визначає компроміс між максимізацією синергетичного ефекту й мінімізацією ризиків. У разі нормалізації функції $S(G)$ та $R(G)$ до інтервалу $[0,1]$ значення параметра λ доцільно обмежити таким само діапазоном.

У процесі аналізу встановлено, що параметр λ виконує роль регулятора кластера й сприяє моделюванню різних сценаріїв політики, наприклад, інноваційно-орієнтованому або стабілізаційному.

Отже, запропонований агентно орієнтований підхід дає змогу моделювати адаптивну поведінку окремих учасників кластера й досліджувати формування макроекономічних ефектів унаслідок їх локальних взаємодій.

Для переходу від статичного аналізу до динамічного й прогнозного управління складними

соціально-економічними системами в моделюванні інноваційно-інжинірингових кластерів використовують цифрові двійники. Вони допомагають інтегрувати структурну модель кластера (граф взаємодій)

із поведінковими характеристиками агентів і зовнішніми управлінськими впливами, забезпечуючи можливість проведення сценарного (*what-if*) аналізу в реальному або наближеному до реального часу. Це дає змогу оцінювати наслідки управлінських рішень, змін у політиці чи ринкових умовах без ризику для реальної системи, а також підвищує обґрунтованість стратегічного планування розвитку кластерів.

Тому всі попередні компоненти інтегруються в цифровий двійник:

$$DT(t) = (G(t), X(t), U(t)),$$

де $G(t)$ – структура кластера; $X(t) = \{x_i\}$ – стани агентів; $U(t)$ – керівні впливи.

Розроблену модель запропоновано реалізувати в три взаємопов'язані фази.

1. Аналітико-математична фаза. На основі агрегованих статистичних і експертних показників будується матриця ознак учасників кластера. Застосовується факторний аналіз для виявлення ключових груп змінних, які визначають розвиток кластера (підприємницький клімат, науковий потенціал, державна підтримка тощо).

2. Обчислювально-імітаційна фаза. Формується початкова структура кластера з використанням алгоритмів кластеризації та методів аналізу графів. Далі за допомогою агентно орієнтованого моделювання імітується розвиток системи:

- поява нових підприємств;
- формування коопераційних зв'язків;
- вплив державної політики;
- дифузія інновацій, унаслідок якої створюється динамічна модель, здатна відтворювати поведінку реальних учасників.

3. Інтеграційно-прогнозна фаза. Побудований кластер віртуалізується у вигляді цифрового двійника, який відтворює як поточний стан системи, так і можливі сценарії розвитку. У цифровому двійнику інтегруються дані з різних джерел у реальному часі, що дає змогу проводити *what-if*-симуляції, прогнозувати результати управлінських рішень і оцінювати ризики.

Унаслідок використання запропонованої моделі маємо такі результати: кластерні карти регіонів,

графові структури взаємодії, імітаційні сценарії розвитку, цифровий двійник кластера з можливістю інтерактивного аналізу.

Для апробування розробленої моделі проведено імітаційне моделювання функціонування регіонального інноваційно-інжинірингового кластера. У межах симуляції сформовано модель кластерної екосистеми, яка містить:

- десять підприємств (виробничі та високотехнологічні компанії);
- два університети (освітньо-наукові центри);
- два інвестори (фонди венчурного капіталу);
- один державний орган (регіональна адміністрація).

Така структура дала змогу відтворити типову модель взаємодії ключових учасників інноваційного середовища й проаналізувати вплив коопераційних зв'язків і управлінських факторів на динаміку розвитку кластера.

Незважаючи на відносно незначну кількість агентів у змодельованому кластері, така конфігурація є репрезентативною та типовою для пілотного моделювання інноваційних екосистем. Вибір обмеженої кількості учасників зумовлений необхідністю забезпечення прозорості інтерпретації результатів, відстеження взаємодій між агентами та валідації поведінкових закономірностей моделі. Запропонована структура кластера відтворює ключові типи учасників реальних інноваційних систем (підприємства, університети, інвестори, державні інституції) та базові зв'язки між ними, що дає підстави вважати її узагальненою моделлю.

Важливо наголосити, що розроблена інтелектуальна модель не має обмежень щодо розміру системи: завдяки використанню графового подання, агентно орієнтованого підходу й алгоритмів машинного навчання вона може бути легко масштабована до значно більшої кількості агентів без зміни базових принципів функціонування. Отже, досягнуті результати можуть бути екстрапольовані на реальні регіональні або національні кластери значного масштабу.

Для кожного учасника бралися до уваги такі показники: обсяг інвестицій в інновації, рівень співпраці з іншими організаціями, кількість спільних проектів, кадровий потенціал.

Етап 1. Кластеризація підприємств

За допомогою алгоритму *k-means* підприємства було поділено на три підкластерні групи:

- 1) інноваційні виробники – підприємства з високими витратами на R&D;
- 2) традиційні виробники – підприємства з низьким рівнем інноваційності, але стійкими економічними показниками;
- 3) стартапи – малі компанії, орієнтовані на швидке зростання та співпрацю з університетами.

Етап 2. Графова модель кластера

Інноваційно-інжиніринговий кластер подано на рис. 1.

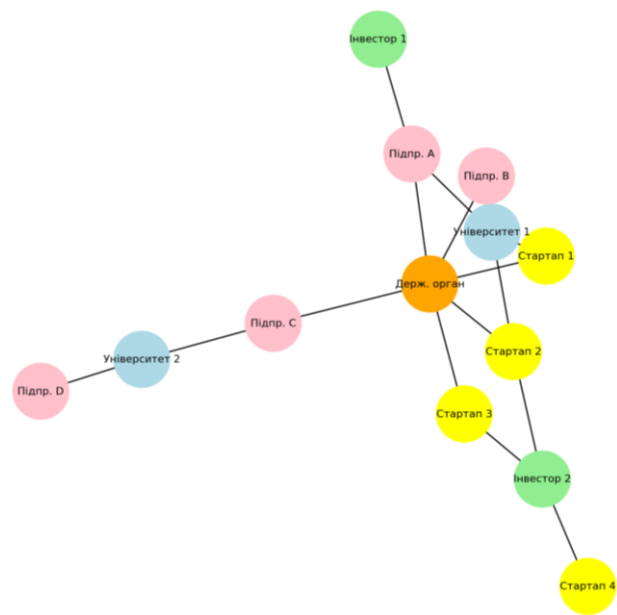


Рис. 1. Графова модель інноваційно-інжинірингового кластера

На основі рис. 1 можна зробити такі висновки:

- найбільш центральним вузлом виявився університет 1 (висока *betweenness centrality*), оскільки він пов'язує стартапи з великими виробниками;
- інвестор 2 утворює "хаб фінансування", підтримуючи відразу три стартапи;
- державний орган з'єднаний з усіма підприємствами через програми підтримки, але має низьку інтенсивність зв'язків.

Етап 3. Агентно орієнтована симуляція

Проведено симуляцію на 10 періодах (умовно – 10 років), унаслідок якої досягнуто таких результатів:

- за умови державних грантів частка підприємств, що впроваджують інновації, зростає з 40% до 70%;
- за відсутності такої підтримки рівень інноваційності залишався на рівні 45%;

– мережа знанневих зв'язків стала більш щільною: середній коефіцієнт кластеризації графа зріс із 0,32 до 0,55.

Етап 4. Цифровий двійник

На основі отриманих показників сформовано цифровий двійник кластера, який дає змогу:

– моделювати сценарії ("що буде, якщо інвестор піде з ринку", "що буде, якщо університет відкриє нову лабораторію");

Таблиця 1. Результати симуляції роботи моделі

Показник	Початкове значення	Через 10 періодів (з держпідтримкою)	Через 10 періодів (без підтримки)
Частка підприємств із R&D	40%	70%	45%
Середня кількість партнерств / фірм	2,1	4,3	2,5
Коефіцієнт кластеризації графа	0,32	0,55	0,36
Кількість спільних проєктів	15	34	18

– оцінювати зміни в продуктивності та кількості інноваційних проєктів;

– візуалізувати вплив політики на рівень співпраці. Результати симуляції роботи моделі подано в табл. 1.

Для більшої наочності результати симуляції подано на рис. 2.

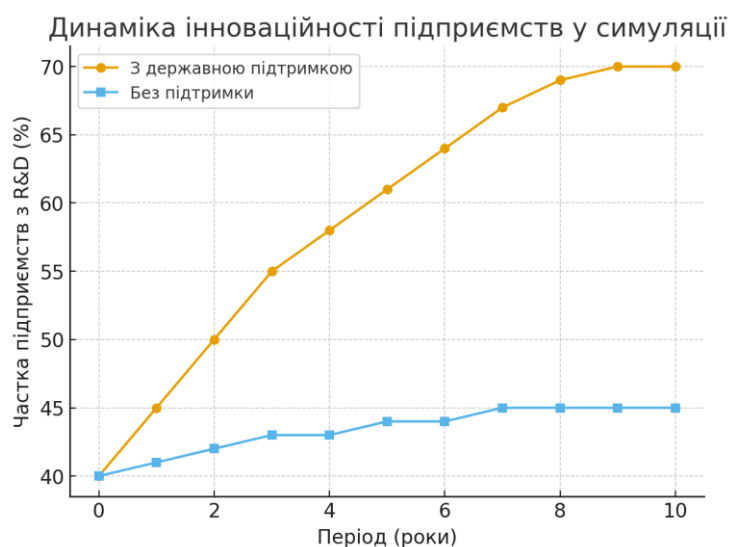


Рис. 2. Результати симуляції роботи запропонованої моделі

Отже, на основі проведеної симуляції можна зробити висновки.

1. Використання графових моделей дає змогу ідентифікувати ключових гравців (університети, інвестори).

2. Агентні симуляції показали значний вплив державної політики на інноваційну активність.

3. Цифровий двійник забезпечує інструментарій для прогнозування й візуалізації сценаріїв розвитку.

4. Досягнуті результати підтверджують ефективність інтеграції методів комп'ютерних наук у дослідженні промислових кластерів.

Результати дослідження

У процесі впровадження розробленої інтелектуальної гібридної моделі інноваційно-

інжинірингових кластерів досягнуто певних результатів.

1. Застосування алгоритмів кластеризації (*k-means*, DBSCAN) дало змогу виокремити три основні групи: інноваційні виробники, традиційні виробники й стартапи. Це дало змогу визначити їх особливі ролі у функціонуванні кластера.

2. Аналіз центральностей продемонстрував, що університети виконують роль "посередників знань", з'єднуючи стартапи й великі підприємства. Інвестори формують фінансові хаби, а державні органи забезпечують загальну інституційну підтримку.

3. Імітаційна симуляція на горизонті 10 періодів продемонструвала, що державна підтримка (гранти, податкові пільги) суттєво підвищує частку підприємств, які інвестують у R&D (з 40% до 70%), тоді як без підтримки цей показник зростає лише

до 45%. Також зафіксовано збільшення коефіцієнта кластеризації мережі з 0,32 до 0,55, що свідчить про посилення взаємодії між учасниками.

4. Створено прототип цифрового двійника кластера, який сприяє об'єднанню реальних показників (статистичних, експертних, операційних) з результатами симуляцій. Це забезпечує можливість моделювати сценарії розвитку (наприклад, вихід інвестора з ринку чи поява нових дослідницьких лабораторій) і оцінювати їх наслідки для інноваційної активності.

5. Застосування запропонованої методології підтвердило її ефективність: цифрова репрезентація кластера здатна відтворювати не лише статичний стан, а й динаміку взаємодії в реальному й прогнозованому часовому горизонті.

Висновки

Розроблено гібридну модель інноваційно-інжинірингового кластера, яка поєднує методи машинного навчання, аналізу графів, агентного моделювання та цифрових двійників. Проведений експериментальний приклад продемонстрував, що впровадження запропонованого підходу дає змогу не лише виявити структуру й ключових учасників кластера, але й оцінити вплив управлінських рішень і політики на інноваційний розвиток. Модель підтвердила, що державна підтримка значно підсилює синергетичний ефект кластера: підвищується рівень інноваційності підприємств, зростає щільність мережесв'язків і збільшується кількість спільних проєктів. Використання цифрового двійника забезпечує новий рівень інтеграції даних і симуляцій, створюючи інструмент для прогнозування сценаріїв розвитку регіональних інноваційних систем.

Досягнуті результати підтверджують високу ефективність застосування сучасних математичних методів для дослідження й розвитку інноваційно-

інжинірингових кластерів, що є особливо актуальним для України з огляду на відновлення та інтеграцію до європейського економічного простору.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на розширення запропонованої моделі за допомогою інтеграції потокових даних у реальному часі, використання більш складних архітектур графових нейронних мереж і методів глибинного навчання для прогнозування еволюції кластерів. Окрему увагу доцільно приділити практичній реалізації цифрового двійника регіонального інноваційно-інжинірингового кластера з інтеграцією відкритих державних, економічних і виробничих показників для підтримки стратегічного управління розвитком регіональних інноваційних екосистем.

Конфлікт інтересів

Автор декларує, що не має конфлікту інтересів, зокрема фінансового, особистого, авторського чи будь-якого іншого характеру, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, опубліковані в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних матеріалів у сховищі даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не застосовував технології ШІ для написання роботи.

References

1. Delgado, M., Porter, M. E., Stern, S. (2016), "Defining clusters of related industries", *Journal of Economic Geography*, Vol. 16(1), pp. 1–38. DOI: <https://doi.org/10.1093/jeg/lbv017>
2. Bouet, A., Klimenko, M. (2019), "Graph clustering in industrial networks", *IMA Journal of Applied Mathematics*, Vol. 84(6), pp. 1177–1202. DOI: <https://doi.org/10.1093/imamat/hxz028>
3. Kireyev, A., et al. (2022), "Community detection in international production networks", *PLOS ONE*, Vol. 17(3), e0264623. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264623>
4. De Paolis, L. T., et al. (2022), "Identifying key sectors in global trade networks", *Applied Network Science*, Vol. 7, p. 19. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41109-022-00519-2>
5. Peel, L., Delvenne, J. C., Lambiotte, R. (2020), "Community detection without edges", *Science Advances*, Vol. 6(19), eaav1478. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav1478>

6. Zhang, J., Li, X. (2003), "Agent-based modeling of high-tech industrial clusters", *Journal of Evolutionary Economics*, Vol. 13(5), pp. 529–548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00191-003-0178-4>
7. Wang, J., et al. (2014), "Diffusion of technological innovations in Chinese regions: An agent-based model", *Papers in Regional Science*, Vol. 93(1), pp. 131–151. DOI: <https://doi.org/10.1111/pirs.12069>
8. Albino, V., Fraccascia, L., Giannoccaro, I. (2016), "Exploring the role of contracts in industrial symbiosis", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pp. 4353–4364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.070>
9. Zheng, L., et al. (2017), "Agent-based modeling of industrial symbiosis", *Sustainability*, Vol. 9(5), p. 765. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9050765>
10. Yazan, D. M., et al. (2020), "Hybrid agent-based model of industrial symbiosis", *International Journal of Production Research*, Vol. 58(20), pp. 6188–6206. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1590660>
11. Lange, S., Korevaar, G., Ohnishi, S. (2021), "Behavioral aspects in industrial symbiosis", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, Vol. 24(3), p. 6.
12. García, F., Bregón, A., Martínez-Prieto, M. A. (2024), "A Digital Twin Learning Ecosystem for traditional manufacturing", *Internet of Things*, Vol. 23, p. 101094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101094>
13. Siatras, V., et al. (2024), "Multi-agent digital twin for decentralized manufacturing scheduling", *Information*, Vol. 15(6), pp. 337. DOI: <https://doi.org/10.3390/info15060337>
14. Wang, J., et al. (2024), "Digital twin-based energy management in industrial parks", *Energies*, Vol. 17(23), p. 5972. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17235972>
15. Akroyd, J., et al. (2021), "Dynamic knowledge graphs for universal digital twins", *Data-Centric Engineering*, Vol. 2, e6. DOI: <https://doi.org/10.1017/dce.2021.7>
16. Sellami, M., et al. (2024), "Graph neural networks for international trade prediction", *Big Data and Cognitive Computing*, Vol. 8(6), p. 65. DOI: <https://doi.org/10.3390/bdcc8060065>
17. Kosasih, F. D., et al. (2024), "Knowledge graphs and neurosymbolic AI for supply chain risk detection", *International Journal of Production Research*, Vol. 62(1), pp. 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2100841>
18. Zhou, Z., et al. (2023), "Hierarchical graph neural networks for supply chain risk assessment", *arXiv preprint arXiv:2305.11291*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.04244>
19. Yanholenko, O., Grinchenko, M., Rohovyi, M., Yakovleva, O., Rogovyi, A. (2025), "Intelligent team work planning: a model for increasing sprint value", *Proceedings of the PhD Workshop on Artificial Intelligence in Computer Science at 9th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS-2025)*, pp. 134–149.

Received (Надійшла) 21.04.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.05.2026

Publication date (Дата публікації) 29.05.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Роговий Антон Іванович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри стратегічного управління, Харків, Україна;

Anton Rogovyi – PhD (Technical Sciences), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor of the Strategic Management Department, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: anton.rogovyi@khpi.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8178-4585>

Ахієзер Олена Борисівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувачка кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна;

Olena Akhiezer – Phd (Computer Sciences), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Olena.Akhiezer@khpi.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>

Решетнікова Світлана Миколаївна – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна;

Svitlana Reshetnikova – National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Associate Professor of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Svetlana.Reshetnikova@khpi.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0009-1435-8656>

Колбасін Владислав Олександрович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, Харків, Україна;

Vladyslav Kolbasin – National Technical University "Kharkiv polytechnic institute", Senior Lecturer of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: Vladyslav.Kolbasin@khp.edu.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0009-0007-0835-2712>

Пахомов Юрій Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна;

Yuriy Pakhomov – PhD (Technical Sciences), Associate Professor, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Associate Professor of the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: abc050073@gmail.com

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-2267-8600>

INTELLIGENT MODEL FOR THE FORMATION OF INNOVATION AND ENGINEERING CLUSTERS

In the context of digitalization and the development of the knowledge economy, innovation and engineering clusters are transforming into complex dynamic systems characterized by a high level of uncertainty, multifactor interactions, and significant dependence on external managerial influences. Traditional economic and mathematical approaches do not provide sufficient flexibility for modeling such systems, which necessitates the application of integrated artificial intelligence methods. The aim of this study is to develop and validate a hybrid model for the formation of innovation and engineering clusters that combines machine learning methods, graph analysis, agent-based modeling, and digital twins, followed by an assessment of the synergistic effect of their functioning and an analysis of the impact of managerial factors on cluster development dynamics. The study employs a multilevel approach that includes agent clustering (k-means, DBSCAN), construction of a graph-based interaction model, application of graph neural networks to account for topological dependencies, and agent-based modeling to investigate the evolution of the system over time. Additionally, agent compatibility and risk functions are introduced to formalize the synergistic effect and cluster resilience within an optimization framework. The integration of all components is implemented in the form of a digital twin, enabling scenario analysis capabilities.

Research Results. The model was validated on a simulated regional cluster consisting of enterprises, universities, investors, and a governmental body. Simulation results demonstrated that government support significantly increases the innovation activity of cluster participants, enhances the density of network connections, and raises the number of cooperative projects. Key nodes of network interaction were identified, particularly the role of universities as knowledge transfer centers and investors as financial hubs.

Conclusions. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach and its suitability for forecasting the development of innovation ecosystems and supporting strategic managerial decision-making. The developed model provides a comprehensive integration of machine learning methods, graph analysis, agent-based modeling, and digital twins, enabling the transition from static cluster analysis to adaptive and predictive management. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the proposed approach to support regional innovation policy, evaluate the effectiveness of managerial decisions, and form sustainable innovation and engineering ecosystems.

Keywords: innovation and engineering clusters, artificial intelligence, machine learning, graph analysis, graph neural networks, agent-based modeling, digital twin.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Роговий А. І., Ахієзер О. Б., Решетнікова С. М., Колбасін В. О., Пахомов Ю. В. Інтелектуальна модель формування інноваційно-інжинірингових кластерів. *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*. 2026. № 2 (189). С. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2026.189.047>

Rogovyi, A., Akhiezer, O., Reshetnikova, S., Kolbasin, V., Pakhomov, Y. (2026), "Intelligent Model for the Formation of Innovation and Engineering Clusters", *Management Information System and Devices*, No. 2 (189), P. 47–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/0135-1710.2026.189.047>