

УДК 303.732.4

Н. В. Кузнецова, О. С. Шевчук

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, к. 35, 03056, Київ, Україна
e-mail: natalia-kpi@ukr.net, oleksii.shevchuk.bus@gmail.com

Модифікований агентно-орієнтований метод оцінки ризиків зелених проєктів і технологій

Розглянуто моделювання, аналіз та оцінку зелених проєктів і технологій. Основною відмінністю зелених проєктів є їхня суто екологічна спрямованість, і певне нехтування економічного фактору. Запропоновано покращений агентно-орієнтований метод імітації діяльності фінансових компаній у середовищі, у якому встановлено обмеження на використання природних ресурсів і введено ринок зелених квот. Розглянуто поведінкові стратегії, що визначають цілі та логіку прийняття рішень агентів під час моделювання. Моделювання різних стратегій компаній показало, що поведінкова стратегія є визначальним фактором, що впливає на майбутнє фінансової компанії. Так, при виборі ефективної стратегії компанія може адаптуватися до введення режиму зелених квот і продовжити зростати в економічній складовій, проте, при виборі неефективної стратегії, компанії може загрозувати банкрутство.

Ключові слова: агентно-орієнтоване моделювання, оцінка ризиків, зелені ризики, зелені проєкти, стохастичний процес, поведінкові стратегії.

Вступ

Екологічна криза є важливою проблемою сучасного суспільства. Великий обсяг екологічних викидів, зокрема діоксиду вуглецю CO₂, є причиною глобального потепління, зміни клімату та зростаючої кількості стихійних лих. Зелене квотування стало важелем впливу урядів країн на приватні компанії і способом стимулювати їх знаходити екологічні рішення у виробництві з метою сталого зниження обсягів екологічних забруднень. Незважаючи на те, що у 2025 р. Сполучені Штати Америки вже вдруге вийшли з Паризької кліматичної угоди (попередній вихід країни був у 2020 р., а повернення у 2021 р.), вони будуть змушені повертатися до зобов'язання зі скорочення шкідливих викидів в атмосферу, зниження негативного впливу на екосистему, оскільки довге ігнорування даної проблеми може спричинити непоправні екологічні зміни та суттєві економічні збитки для країни.

© Н. В. Кузнецова, О. С. Шевчук

Україна на шляху до вступу до Євросоюзу також змушена враховувати вимоги та проводити зміни відповідно до встановленої нормативної бази та вимог курсу на зелені трансформації. Так, у січні 2025 року Міністерством цифрової трансформації України було представлено стратегію, в якій окреслено план цифрового розвитку інноваційної діяльності України до 2030 року. Особлива увага приділяється впровадженню інновацій у GreenTech, зокрема проектам декарбонізації і зберігання електроенергії і технологій енергоефективності в промисловості. Для фінансових компаній це формує новий виклик, оскільки з'являється потреба в адаптації до нових умов. Ці зміни створюють потребу в інструментах аналізу і оцінки компаній у новому фінансовому середовищі, де екологічна компонента має значний вплив на економічну діяльність.

Постановка завдання

В умовах впровадження зеленого курсу, компанії стикаються зі складною задачею балансування між економічною ефективністю та екологічною відповідністю. Традиційні методи оцінки ризиків часто не дають можливості чітко оцінити та врахувати економічні перспективи, тому виникає потреба розробки інструментарію, який дозволив би моделювати сценарії розвитку компаній під впливом як ринкових, так і регуляторних екологічних чинників.

Метою роботи є розробка та дослідження модифікованої версії агентно-орієнтованого методу імітації діяльності фінансових компаній у середовищі, в якому динамічно регулюється використання екологічних ресурсів (викиди CO₂, стічні води та споживання питної води). Завдання полягає у створенні моделі, що включає ринок зелених квот і дозволяє налаштовувати поведінкові стратегії агентів для аналізу їхньої стійкості до змінних вимог середовища і аналізу ефективності розглянутих стратегій.

Огляд літератури

Агентно-орієнтований підхід — це відносно новий підхід до комп'ютерного моделювання, що застосовується для імітації дій і взаємодій агентів у визначеному середовищі з метою вивчення складних явищ на основі простих локальних взаємодій [1]. Фундаментальна перевага зазначеного підходу полягає у здатності генерувати емерджентні властивості високого рівня через механізми мікроевзаємодій. Зокрема, це є актуальним для економічних ринків, які традиційно ґрунтувалися на поняттях досконалих ринків, однорідних агентів і довгострокової рівноваги, що робило їх аналітично та обчислювально доступними [2].

Агентно-орієнтований підхід має широкий спектр застосування. Так, його використання можна знайти у дослідженні процесів ціноутворення на ринку нерухомості [3, 4]. У сфері електроенергетики, поєднання агентно-орієнтованого підходу із теорією ігор використовується для аналізу секторальної динаміки на ринку електроенергії і визначення оптимального балансу між традиційними та відновлюваними джерелами енергії [5, 6].

У галузі «зеленої» промисловості та регуляції викидів вуглецю, агентно-орієнтований підхід також знайшов застосування. Наприклад, для оцінки та вдосконалення схеми торгівлі квотами на викиди CO₂ у Тайвані було використано поєднання

агентно-орієнтованого підходу та аналізу економічної ефективності [7]. Інше дослідження [8] симулювало схему торгівлі вуглецевими квотами, зосереджуючись на різноманітності агентів з точки зору розмірів компаній, стилів управління та горизонтів планування. Метою моделювання було проаналізувати, як ці чинники впливають на поведінку компаній, і як ринок діоксиду вуглецю CO₂ впливає на компанії та навпаки.

Таким чином, існуючі дослідження здебільшого фокусуються на окремих аспектах регулювання або використовують спрощені моделі поведінки агентів. Недостатньо дослідженим залишається комплексний вплив екологічних квот на фінансову стійкість компаній в умовах динамічної «зеленої» політики. Тому дана робота направлена на розробку модифікованого методу, що дозволяє моделювати адаптивні стратегії компаній та оцінювати ризики їхньої діяльності за певної економічної політики.

Опис агентно-орієнтованого методу

У роботі розроблено та застосовано агентно-орієнтований метод для симуляції комерційної діяльності фінансових компаній у середовищі з регулюванням використання екологічних ресурсів і сформованим ринком зелених квот. Ґрунтуючись на принципах і кроках попередньої версії агентно-орієнтованого методу [9], даний метод пропонує покращення, що проявляються у більш гнучкій і різноманітній поведінці агентів та елементів середовища. При цьому було впроваджено додаткові інструменти налаштування агентів, середовища та системи в цілому. Ці нововведення дають можливість формувати й аналізувати різні поведінкові стратегії агентів і політики середовища.

Загальний опис компонентів агентно-орієнтованого методу.

Основними компонентами агентно-орієнтованого методу є **агенти** та **середовище**. Агентами є фінансові компанії, що належать до різних індустрій. Агенти характеризуються економічними і екологічними показниками, а також мають якісні характеристики. До якісних характеристик агента належить галузева приналежність і показники ефективності діяльності. У методі передбачена можливість покращення характеристик ефективності агентами шляхом інвестування. Агенти вільні в керуванні власними ресурсами, проте вони змушені дотримуватися встановлених середовищем правил і обмежень. Середовище є зовнішньою компонентою методу, що регулює діяльність і взаємодію агентів. Також середовище відповідальне за зовнішні процеси системи, що відбуваються за уніфікованими правилами для всіх агентів, зокрема генерацію прибутку і екологічних забруднень. Окрім цього, саме елементи середовища відповідальні за процеси видачі та регуляції політики зелених квот.

Опис агентів.

Агент характеризується набором показників, які можна класифікувати як *загальні/якісні, економічні та екологічні*: «Назва компанії», «Галузь», «Загальні активи», «Витрати», «Дохід», «Забруднення», «Інвестиції у фінансову ефективність», «Інвестиції в екологічну ефективність». Показник «Витрат» є складеним значенням, яке розраховується як сума двох стандартних фінансових показників: *загальних операційних витрат і собівартості реалізованої продукції*.

Фінансові показники (*загальні активи, загальні операційні витрати, собівартість реалізованої продукції і дохід*) — це дані річних фінансових звітів компаній. *Забруднення* є екологічним показником, що описує річний сукупний вплив компанії на екологію (викиди CO₂ і стічні води та використання інших водних ресурсів), що було конвертовано у грошовий еквівалент згідно з методологією Гарвардської Бізнес-Школи [10].

Іншою характеристикою агентів є інвестиції. Інвестиції поділяються на економічні і екологічні, вони визначають розвиток відповідного типу ефективності агентів. Показники ефективності мають значний вплив на підрахунок згенерованого доходу і об'єму забруднень. Показники ефективності розраховуються за формулами:

$$Eff_{k,i,t}^{fin} = 1 - \frac{1}{e^{\lambda^{fin} * c_k^{fin} * \sum_{j=1}^{t-1} I_{k,i,j}^{fin}}}, \quad (1)$$

де $\sum_{j=1}^{t-1} I_{k,i,j}^{fin}$ — сума інвестицій в економічну ефективність за попередні ітерації; $c_k^{fin} \in (0, \infty)$ — параметр значущості інвестицій в економічну ефективність; λ^{fin} — параметр значущості усіх інвестицій в економічну ефективність;

$$Eff_{k,i,t}^{eco} = 1 - \frac{1}{e^{\lambda^{eco} * c_k^{eco} * \sum_{j=1}^{t-1} I_{k,i,j}^{eco}}}, \quad (2)$$

де $\sum_{j=1}^{t-1} I_{k,i,j}^{eco}$ — сума інвестицій в екологічну ефективність за попередні ітерації; $c_k^{eco} \in (0, \infty)$ — параметр значущості інвестицій в екологічну ефективність; λ^{eco} — параметр значущості усіх інвестицій в екологічну ефективність.

Параметри c_k^{fin} , c_k^{eco} , λ^{fin} та λ^{eco} використовуються для налаштування впливу інвестування на ефективність, як для усіх агентів, так і в рамках галузі чи окремого агента.

Опис середовища.

Середовище об'єднує усі зовнішні елементи та процеси системи, що будуть справедливими для усіх агентів. У даному методі розглядаються два елементи середовища: **Глобальна Система Управління Квотами (ГСУК)** та **Ринок Зелених Квот (РЗК)**.

ГСУК є елементом середовища, що відповідає за підрахунок і видачу зелених квот, а також контролює виконання правил зеленого квотування та нараховує штрафи. ГСУК ініціалізується перед початком ітеративного процесу та визначає загальний об'єм квот $QC_{i,0}$, що буде надаватися в межах кожної індустрії i відносно початкових показників забруднень агентів $P_{k,i,0}$:

$$QC_{i,0} = \delta^{base} * \sum_{j=1}^n P_{j,k,0}, \quad (3)$$

де $\delta^{base} \in (0,1]$ — параметр, що визначає, яка частка початкових забруднень буде визначена як початковий об'єм квот.

Крім цього, загальний об'єм квот $QC_{i,t}$ лінійно знижується після кожної ітерації на параметр $\delta^{linear} \in (0,1]$, роблячи обмеження поступово більш суворими для агентів і стимулюючи розвиток екологічної ефективності:

$$QC_{i,t+1} = (1 - \delta^{linear}) * QC_{i,t}. \quad (4)$$

Розподіл зелених квот між агентами залежить від їхніх операційних витрат $E_{k,i,t}$. Для отримання квот, агенти надсилають свої операційні звіти та вказують заплановані на поточному кроці операційні витрати. На основі цієї інформації і відбувається розрахунок квот для кожного агента в рамках індустрії i :

$$Q_{k,i,t} = Q_{i,t} * \left(\frac{E_{k,i,t}}{\sum_{j=1}^n E_{j,i,t}} \right). \quad (5)$$

Ринок Зелених Квот (РЗК) є торгівельним майданчиком для агентів, що дозволяє перерозподіляти квоти між компаніями. Агенти можуть спробувати продати потенційний надлишок зелених квот на ринку, або компенсувати нестачу квот шляхом їхньої купівлі.

Алгоритм агентно-орієнтованої взаємодії.

Одна ітерація алгоритму моделювання складається із десяти послідовних кроків (рис. 1). Ці кроки можуть бути умовно поділені на етапи: *планування, торгівлі квотами, операційної діяльності та імплементації результатів*. Кожній ітерації алгоритму відповідає один рік фінансової діяльності компанії. Розглянемо кожен крок детальніше далі.



Рис. 1. Схема однієї ітерації моделювання

Крок 1: «Планування витрат».

На кроці планування витрат визначаються операційні витрати $E_{k,i,t}$, що будуть використані агентом k на поточній ітерації t . Обсяг нового операційного бюджету визначається шляхом аналізу результатів попередньої ітерації, при цьому агент оцінює як економічну, так і екологічну складову діяльності. Економічна складова розглядається у вигляді зміни чистих прибутків $\Delta NR_{k,i,t}$ агента:

$$\Delta NR_{k,i,t} = \begin{cases} \frac{NR_{k,i,t}}{A_{k,i,t}}, & \text{якщо } NR_{k,i,t} < 0 \text{ і } NR_{k,i,t-1} < 0 \\ \frac{NR_{k,i,t} - NR_{k,i,t-1}}{A_{k,i,t}}, & \text{інакше} \end{cases}, \quad (6)$$

де $NR_{k,i,t}$ — чистий прибуток агента k на ітерації t ; $A_{k,i,t}$ — загальні активи агента k на ітерації t .

Екологічну складову агент аналізує на основі значення перевищення квот $\Delta QE_{k,i,t}$:

$$\Delta QE_{k,i,t} = \begin{cases} \frac{QE_{k,i,t}}{A_{k,i,t}}, \text{ якщо } QE_{k,i,t} < 0 \text{ і } QE_{k,i,t-1} < 0 \\ \frac{QE_{k,i,t} - QE_{k,i,t-1}}{A_{k,i,t}}, \text{ інакше} \end{cases}, \quad (7)$$

де $QE_{k,i,t} = Q_{k,i,t} - P_{k,i,t}$ — різниця між наданою квотою та значенням згенерованого екологічного впливу.

Кожна складова впливає на підрахунок зміни операційних витрат $\Delta E_{k,i,t}$ з певною силою, що залежить від поведінкової стратегії агента. Значення зміни операційних витрат визначається за формулою:

$$\Delta E_{k,i,t} = E_{k,i,t} * (\omega_k^{NR} * \Delta NR_{k,i,t} + \omega_k^{QE} * \Delta QE_{k,i,t}), \quad (8)$$

де $\omega_k^{NR} + \omega_k^{QE} = 1$ — параметри сили впливу складових.

На значення зміни операційних витрат $\Delta E_{k,i,t}$ також накладається додаткове обмеження на мінімальне та максимальне значення. Розмір мінімуму та максимуму залежить від налаштувань і поведінкової стратегії агента. В результаті, значення зміни витрат із обмеженням за розміром зміни визначається таким чином:

$$\Delta E_{k,i,t}^{capped} = \begin{cases} \text{sign}(\Delta E_{k,i,t}) * \theta_k^{upper} * \Delta E_{k,i,t}, \text{ якщо } |\Delta E_{k,i,t}| > \theta_k^{upper} * E_{k,i,t}, \\ \text{sign}(\Delta E_{k,i,t}) * \theta_k^{lower} * \Delta E_{k,i,t}, \text{ якщо } |\Delta E_{k,i,t}| < \theta_k^{lower} * E_{k,i,t}, \\ \Delta E_{k,i,t}, \text{ інакше,} \end{cases} \quad (9)$$

де θ_k^{upper} — верхнє обмеження на зміну операційних витрат для агента k ; θ_k^{lower} — нижнє обмеження на зміну операційних витрат для агента k .

Кінцеве значення операційних витрат на ітерацію визначається за формулою:

$$E_{k,i,t+1} = \max(0, \min(A_{k,i,t}, E_{k,i,t} + \Delta E_{k,i,t}^{capped})). \quad (10)$$

Крок 2: «Планування інвестицій»

На кроці планування інвестицій визначається загальний інвестиційний бюджет $I_{k,i,t}$ шляхом виокремлення частки ρ_k^{budget} від чистого прибутку з попередньої ітерації. У випадку збитковості, агент формує інвестиційний бюджет з вільних фінансових активів, де відокремлює певну частину ρ_k^{min} на розвиток ефективності (рівняння (11)). Значення параметрів ρ_k^{budget} та ρ_k^{min} залежать від налаштувань агента та його поведінкової стратегії.

$$I_{k,i,t} = \begin{cases} \rho_k^{budget} * \min(\max(0, A_{k,i,t} - E_{k,i,t}), NR_{k,i,t-1}), \text{ при } NR_{k,i,t-1} \geq 0, \\ \rho_k^{min} * \max(0, A_{k,i,t} - E_{k,i,t}), \text{ при } NR_{k,i,t-1} < 0. \end{cases} \quad (11)$$

Загальний інвестиційний бюджет може бути направлений на розвиток економічної ефективності $EFF_{k,i,t}^{fin}$ та екологічної ефективності $EFF_{k,i,t}^{eco}$ агента. Розподіл

бюджету між цими напрямками залежить від поведінкової стратегії агента та налаштовується за допомогою параметрів ρ_k^{fin} та ρ_k^{eco} ($\rho_k^{fin} + \rho_k^{eco} = 1$):

$$I_{k,i,t}^{fin} = \rho_k^{fin} * I_{k,i,t}, \quad (12)$$

$$I_{k,i,t}^{eco} = \rho_k^{eco} * I_{k,i,t}. \quad (13)$$

Крок 3: «Планування екологічного забруднення».

Оцінка значення екологічного впливу необхідна агентам для подальшої торгівлі квотами. Прийняття агентами рішення щодо купівлі/продажу зелених квот залежить від порівняння наявних квот з очікуваннями щодо екологічного впливу внаслідок фінансової діяльності. На даному кроці, агент може застосувати один із двох підходів до оцінки екологічного впливу: загальний підхід та підхід *MLP-регресії*.

Загальний підхід використовувався у попередній версії методу [9] і його ідея полягала у зіставленні операційних витрат на попередній і поточній ітераціях. На основі цього порівняння визначалося значення очікуваного екологічного впливу $EP_{k,i,t}$:

$$EP_{k,i,t} = P_{k,i,t-1} * \left(1 + \frac{E_{k,i,t} - E_{k,i,t-1}}{E_{k,i,t}} \right). \quad (14)$$

Новий альтернативний підхід використовує модель регресії MLP для прогнозування екологічного впливу на поточному кроці. Навчається модель на історичних даних самого агента, при цьому відбувається донавчання після кожної ітерації. Предиктором моделі, окрім операційних витрат $E_{k,i,t}$, є також показник економічної ефективності $EFF_{k,i,t}^{fin}$. Для навчання моделі з'являється необхідність зібрати вибірку даних з метою навчання моделі, тому на першій ітерації моделювання використовується загальний підхід, і лише потім застосовується підхід MLP-регресії.

Крок 4: «Звітність та видача зелених квот».

Торгівля квотами починається зі взаємодії агентів з одним із елементів середовища, а саме ГСУК. Ця взаємодія необхідна для підрахунку та видачі системою зелених квот. У звіті агенти вказують свою індустрію діяльності, а також визначені на першому кроці операційні витрати $E_{k,i,t}$. Дана інформація необхідна ГСУК для розподілу зелених квот між агентами (рівняння (5)).

Крок 5: «Продаж зелених квот».

Маючи дані про наявні зелені квоти $Q_{k,i,t}$ та оціночне значення очікуваного впливу діяльності на екологію $EP_{k,i,t}$, агент може прийняти рішення щодо участі в процесі торгівлі квотами. У випадку надлишкових квот, агент може сформулювати торговельний лот з метою отримання додаткового прибутку. Кількість квот, які агент готовий продати $Q_{k,i,t}^{sell}$, визначається на основі різниці наявних квот та очікуваного екологічного впливу (рівняння (15)). При цьому, агент може залишити певну резервну кількість квот на випадок похибки в оцінці значення $EP_{k,i,t}$. Розмір резерву залежить від поведінкової стратегії агента:

$$Q_{k,i,t}^{sell} = \max\left(0, (Q_{k,i,t} - EP_{k,i,t}) * (1 - \mu_k^{sell})\right), \quad (15)$$

де μ_k^{sell} — параметр, що визначає частку резервних квот.

Далі агенту необхідно сформувавши ціну за одиницю товару $UP_{k,i,t}$, для визначення якої агент може скористатися одним із двох підходів: *статичним* чи *динамічним*. Статичний або загальний підхід було представлено у попередній версії моделі [9], і його ідея полягає в тому, що використовується стале значення $UP_{k,i,t}^{default}$.

Для *динамічного* або *історичного* підходу характерна активна залученість агента в процес продажу квот. Таким чином, формула підрахунку відсоткової зміни ціни наступна:

$$\Delta UP_{k,i,p}^{\%} = \frac{Q_{k,i,p}^{sold} - (\tau_k^{sell} * Q_{k,i,p}^{sell})}{\tau_k^{sell} * Q_{k,i,p}^{sell}}, \quad (16)$$

де $Q_{k,i,p}^{sold}$ — кількість проданих квот на кроці p ; τ_k^{sell} — цільова частка продажу зелених квот; p — ітерація, на якій агент востаннє продавав квоти.

Крім цього, максимальна зміна ціни за одиницю товару обмежена параметром γ_k^{sell} :

$$UP_{k,i,t} = \begin{cases} (1 + \text{sign}(\Delta UP_{k,i,p}^{\%}) * \gamma_k^{sell}) * UP_{k,i,p}, & \text{якщо } |\Delta UP_{k,i,p}^{\%}| > \gamma_k^{sell}, \\ (1 + \Delta UP_{k,i,p}^{\%}) * UP_{k,i,p}, & \text{інакше.} \end{cases} \quad (17)$$

Вибір підходу до ціноутворення та значення $UP_{k,i,t}^{default}$, τ_k^{sell} та γ_k^{sell} залежать від налаштування агента. Сформований кінцевий лот публікується на РЗК, де агенти-покупці зможуть розглянути можливість купівлі усього лоту або його частини.

Крок 6: «Купівля зелених квот».

Після наповнення ринку торгівельними пропозиціями починається крок купівлі квот. Даний крок єдиний, де черговість виконання може вплинути на результат. Порядок агентів визначається випадковим чином. Починається даний крок із визначення агентом об'ємів нестачі зелених квот $Q_{k,i,t}^{buy}$. Аналогічно до кроку продажу, агент може закласти додатковий резерв μ_k^{buy} , щоб покрити можливу похибку при оцінці екологічного впливу:

$$Q_{k,i,t}^{buy} = \max(0, (EP_{k,i,t} - Q_{k,i,t}) * (1 + \mu_k^{sell})). \quad (18)$$

Агент формує бюджет для купівлі квот $B_{k,i,t}^{buy}$, на основі власних вільних активів:

$$B_{k,i,t}^{buy} = \alpha_k^{buy} * (A_{k,i,t} - EP_{k,i,t} - I_{k,i,t}), \quad (19)$$

де α_k^{buy} — частка вільних активів, що агент готовий використати для торгівлі.

Купівля квот може відбуватися за одним із трьох підходів: «ігнорування», «повного покриття нестачі» та «економічно ефективним» підходом.

За підходу «ігнорування», агент не буде купувати квоти, приймаючи рішення виплачувати штраф, нарахований ГСУК. Така поведінка характерна компаніям консервативного типу, які ігнорують введення зеленої політики. Підхід «повного покриття нестачі» був представлений у попередній версії методу [9], і його ідея в тому, що агент купує квоти допоки є така потреба, з урахуванням обмеження на купівельний бюджет. «Економічно ефективний» підхід є новим підходом, який характерний компаніям з фінансово грамотною політикою. Агент купуватиме лише

ті квоти, ціна яких не перевищує штраф ($UP_{k,i,t} \leq UP_t^{penalty}$), що нараховує ГСУК. Обмеження на купівельний бюджет залишається.

Крок 7: «Генерація доходу».

Кроки генерації доходу та забруднень відносяться до процесів середовища, оскільки агент безпосередньо не впливає на результатів даних кроків, і вони відбуваються за однаковими правилами для усіх агентів. Крок генерації доходу є стохастичним процесом, метою якого є підрахунок доходу $R_{k,i,t}$, що отримає агент внаслідок операційної діяльності. За допомогою випадковості імітується невизначеність результатів діяльності компаній на фінансовому ринку. Для підрахунку доходу використовується розподіл Гауса:

$$R_{k,i,t} = \text{Gauss}(M_{k,i,t}, V_i) * E_{k,i,t}, \quad (20)$$

де V_i — дисперсія розподілу, яка незмінна протягом усього моделювання та визначається з набору даних для кожної індустрії i .

Математичне сподівання $M_{k,i,t}$ розраховується на основі середньої історичної доходності індустрії, яка коригується індивідуальними показниками агента. Модель враховує, що компанії з вищою економічною ефективністю $EFF_{k,i,t}^{fin}$ і сильнішою конкурентною позицією отримують вищий прибуток. Формула розрахунку має вигляд:

$$M_{k,i,t} = \text{Mean} \left(\frac{\sum_p R_{i,p}}{\sum_p E_{i,p}} \right) * (1 + \psi^{fin} * EFF_{k,i,t}^{fin} + CC_{k,i,t}), \quad (21)$$

де ψ^{fin} — параметр, що визначає значущість впливу фінансової ефективності; $CC_{k,i,t}$ — компонента конкурентоспроможності для агента k в рамках індустрії i .

Компонента конкурентоспроможності $CC_{k,i,t}$ відображає відносну силу агента на ринку. Вона порівнює економічну ефективність агента серед усіх конкурентів у рамках індустрії. Для її підрахунку використовується формула:

$$CC_{k,i,t} = \psi^{comp} * \frac{EFF_{k,i,t}^{fin} - \text{Median}_j(EFF_{j,i,t}^{fin})}{\text{Max}_j(EFF_{j,i,t}^{fin})}, \quad (22)$$

де ψ^{comp} — параметр, що визначає значущість впливу компоненти конкурентоспроможності.

Крок 8: «Генерація екологічних забруднень».

Крок генерації екологічних забруднень є детермінованим процесом, що не містить стохастичної складової. Для розрахунку згенерованого екологічного впливу $P_{k,i,t}$ використовується формула, що враховує екологічну ефективність $EFF_{k,i,t}^{eco}$ агента:

$$P_{k,i,t} = \text{Mean} \left(\frac{\sum_p P_{i,p}}{\sum_p E_{i,p}} \right) * (1 - \psi^{eco} * EFF_{k,i,t}^{eco}), \quad (23)$$

де ψ^{eco} — параметр, який визначає значущість впливу екологічної ефективності; $\text{Mean} \left(\frac{\sum_p P_{i,p}}{\sum_p E_{i,p}} \right)$ — середнє значення відношення екологічного забруднення до операційних витрат, що визначається з вхідного датасету для кожної індустрії.

Крок 9: «Нарахування та виплата штрафів за перевищення квот».

Після підрахунку результатів операційної діяльності відбувається прийняття результатів ітерації агентами та підрахунок основних метрик, зокрема загальних активів. Також проводиться перевірка виконання агентами правил квотування. Для цього, агенти надсилають показники згенерованих екологічних забруднень разом із наявними, після усіх торгівельних операцій, зеленими квотами до ГСУК. На основі цих звітів система розраховує економічні санкції за перевищення квот, які агенти змушені сплатити:

$$QEP_{k,i,t} = UP_t^{penalty} * \max\left(0, P_{k,i,t} - (Q_{k,i,t} + Q_{k,i,t}^{bought} - Q_{k,i,t}^{sold})\right). \quad (24)$$

Для нарахування штрафу використовується мультиплікатор $UP_t^{penalty}$, що характеризує розмір штрафу за одиницю перевищення. Дане значення керується ГСУК і збільшується на певних ітераціях. Ітерації підвищення штрафу та розмір мультиплікатора визначаються у налаштуваннях середовища та ГСУК. Динамічність штрафу імітує поступовість введення політики регуляції використання екологічних ресурсів, де спочатку компаніям надається можливість адаптуватися до змін, а згодом, зі зростанням штрафів, створюється додатковий тиск на агентів, що нехтують зеленою політикою.

Крок 10: «Імплементация інвестицій та завершення ітерації».

Останнім кроком алгоритму є розрахунок агентами зміни їхніх екологічних та економічних характеристик, зокрема загальних активів. Елементи середовища також проводять розрахунки. ГСУК визначає нове значення загальних зелених квот для кожної індустрії (рівняння (3)–(5)), а також, за потреби, підвищує штраф.

Імплементация інвестицій також відбувається на останньому кроці моделювання. В даному випадку відбувається конвертація фінансових ресурсів у показники ефективності агента (рівняння (1), (2)). Ефект розвитку ефективності буде помітним лише наступної ітерації, що імітує затримку між фінансуванням проекту розвитку та його впровадженням.

Моделювання поведінкових стратегій агентів

Поведінкова стратегія — це набір поведінкових факторів, що впливають на рішення агента протягом усього моделювання. Дані фактори задаються параметрами та підходами, що були описані раніше. Таким чином, стратегія впливає на дії агента на різних кроках алгоритму, за рахунок чого відрізняються тенденції розвитку агента як фінансової компанії.

У роботі було сформовано та імплементовано чотири типи поведінкових стратегій: стратегія «Ігнорування», стратегія «Адаптивного бізнесу», стратегія «Зеленої політики», стратегія «Продажу зелених квот».

Стратегія «Ігнорування» відображає консервативний тип компаній, що ігнорують нововведення у сфері зелених технологій і проектів й продовжують фокусуватися виключно на економічній складовій. Розвиток таких компаній також відбувається лише через економічний напрям, що відображається у характері інвестування.

Стратегія «Адаптивного бізнесу» характерна для прогресивних компаній, які слідкують за тенденціями та намагаються адаптуватися до змін. Агенти, що дотримуються даної стратегії, продовжують орієнтуватися на економічну компоненту,

проте розвивають і екологічний напрям, з метою мінімізувати штрафи за перевищення квот.

До стратегії «Зеленої політики» відносяться агенти, що радикально дотримуються політики зелених квот і намагаються усі сили витратити на розвиток екологічної складової діяльності, при цьому може нехтуватися економічна компонента.

Стратегія «Продажу зелених квот» — це прогресивна стратегія, що виникає з появою зеленого квотування та ринку квот. Агенти користуються новими правилами і обирають напрям розвитку екологічності виробництва з метою отримання надлишкових зелених квот і їхнього продажу на ринку.

Для проведення апробації методу було сформовано набір даних з 12 компаній, з економічними і екологічними показниками з 2010 по 2019 роки. Усі компанії займаються виробництвом електроенергії, проте роблять це різними способами, що відносить їх до різних індустрій (сонячні електростанції, гідроелектростанції, теплові електростанції та електростанцій іншого типу). На основі даних 11 компаній було сформовано агентів з різними поведінковими стратегіями. Для порівняння поведінкових стратегій, на основі однієї із компаній було сформовано 4 агенти з кожною згаданою поведінковою стратегією.

Моделювання показало, що поведінкові стратегії мають значний вплив на результати діяльності компаній. Так, на рис. 2 представлено динаміку зміни загальних активів агентів з різними поведінковими стратегіями.

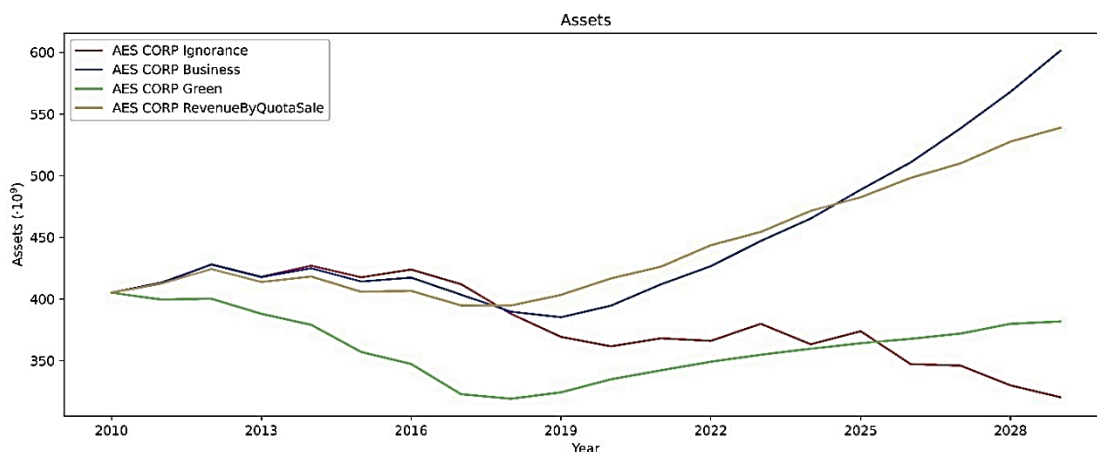


Рис. 2. Динаміка зміни загальних активів агентів із різними стратегіями

Висновки

Дану роботу було спрямовано на удосконалення агентно-орієнтованого методу моделювання діяльності компаній у середовищі, де регулюється використання природних ресурсів та введено ринок зелених квот. Було додано гнучку логіку поведінки агентів, зокрема для етапів планування та торгівлі квотами. Розглянуто поведінкові стратегії агентів, що відповідають за дії агентів під час моделювання. Моделювання показало, що поведінкові стратегії мають ключове значення в перспективах росту та розвитку фінансових компаній. Правильний вибір поведінки може примножити обсяг загальних активів компанії, натомість помилка з вибором стратегії може призвести до банкрутства.

Стратегія «Ігнорування» показала найгірші результати, хоча на короткому терміні вона виявилась досить ефективною. При довгостроковому моделюванні стратегія показала спадний тренд, що веде компанію до банкрутства. Стратегія «Зеленої політики» дозволила компанії адаптуватися до введення зеленого квотування, проте, через недостатню увагу економічній складовій, збільшити обсяги загальних активів компанії не вдалось. Стратегії «Адаптивного бізнесу» та «Продажу зелених квот» показали зростаючу тенденцію розвитку компанії. Стратегія «Адаптивного бізнесу» мала кращі результати на короткому терміні, де штрафи були ще низькими, та на довгостроковій перспективі, коли агент зміг адаптуватися до регуляції використання екологічних ресурсів. З іншого боку, стратегія «Продажу зелених квот», була ефективнішою на середньостроковому терміні моделювання.

Подальші дослідження будуть фокусуватися на розвитку поведінкових стратегій, а саме перевірці налаштувань сформованих поведінкових стратегій та розробці нових стратегій. Можливим напрямком розвитку роботи є аналіз залежності поведінкових стратегій від налаштувань середовища, оскільки для різних умов ступінь ефективності поведінкових стратегій може відрізнятись. Потребує також і подальшого удосконалення агентний метод із використанням підходів регулювання зелених квот, наближених до реального життя.

1. Macal, C., & North, M. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>.
2. Macal, C., & North, M. (2008). Agent-based modeling and simulation: ABMS examples. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, 101–112. <https://doi.org/10.1109/WSC.2008.4736060>.
3. Glavatskiy, K., Prokopenko, M., Carro, A., Ormerod, P., & Harré, M. S. (2021). Explaining herding and volatility in the cyclical price dynamics of urban housing markets using a large-scale agent-based model. *SN Business & Economics*, 1(6), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s43546-021-00084-3>
4. Evans, B. P., Glavatskiy, K., Harré, M. S., & Prokopenko, M. (2023). The impact of social influence in Australian real estate: Market forecasting with a spatial agent-based model. *Journal of Economic Interaction and Coordination*, 18(1), 5–57. <https://doi.org/10.1007/s11403-022-00361-w>
5. Aïd, R., Dumitrescu, R., & Tankov, P. (2021). The entry and exit game in the electricity markets: A mean-field game approach. *Journal of Dynamics & Games*, 8(4), 331–358. <https://doi.org/10.3934/jdg.2021013>
6. Bassière, A., Dumitrescu, R., & Tankov, P. (2024). A mean-field game model of electricity market dynamics. In F. E. Benth & A. E. D. Veraart (Eds.), *Quantitative Energy Finance* (pp. 181–219). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-41168-7_7
7. Huang, H. F., & Ma, H. W. (2022). Redesigning a cap-and-trade program for air emissions by agent-based modeling. *Sustainable Environment Research*, 32(1). 1–12. <https://doi.org/10.1186/s42834-022-00124-7>
8. Yu, S. M., Fan, Y., Zhu, L., & Eichhammer, W. (2020). Modeling the emission trading scheme from an agent-based perspective: System dynamics emerging from firms' coordination among abatement options. *European Journal of Operational Research*. 286(3). P. 1113–1128. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.074>
9. Kuznietsova, N., Shevchuk, O., & Prokopenko, M. (2026). Agent-based method for modelling green risks. In M. Zgurovsky & N. Pankratova (Eds.), *System analysis and data mining* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 609). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-97529-5>
10. Freiberg, D., Park, D. G., Serafeim, G., & Zochowski, T. R. (2021). *Corporate environmental impact: Measurement, data and information* (Harvard Business School Working Paper No. 20-098). Harvard Business School. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3565533>

Надійшла до редакції 25.11.2025