

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**КАФЕДРА ЕКОНОМІЧНОЇ КІБЕРНЕТИКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ І УПРАВЛІННІ»

ЗБІРНИК НАУКОВИХ СТУДЕНТСЬКИХ ПРАЦЬ

ВИПУСК 5



**Одеса
2023**

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОАГЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

Серов М. Ю.¹, Якуб Є. С.²

1 – студент 4 курсу 43 гр., факультет менеджменту, обліку та інформаційних технологій,

2 – др. ф.-м. наук, професор, кафедра економічної кібернетики та інформаційних технологій
Одеський національний економічний університет, м. Одеса

АНОТАЦІЇ

Серов М. Ю., Якуб Є. С. Застосування багатоагентного моделювання в економіці. Агентно-орієнтована обчислювальна економіка (ACE) – це багатодисциплінарна область, яка використовує агентно-орієнтований підхід для глибшого розуміння економічних явищ, що відбуваються на мікро- або макрорівні. У статті досліджено застосування багатоагентних систем для моделювання та імітації віртуальної економіки для дослідження принципів самоорганізації та адаптивності економічних суб'єктів.

Ключові слова: віртуальна економіка, складність, агент, багатоагентна система, самоорганізація, моделювання.

Sierov M., Yakub E. Application of multi-agent modeling in economics. Agent-oriented computational economics (ACE) is a multidisciplinary field that uses an agent-oriented approach to gain a deeper understanding of economic phenomena occurring at the micro- or macro-level. The article examines the application of multi-agent systems for modeling and simulating the virtual economy to study the principles of self-organization and adaptability of economic entities.

Keywords: virtual economy, complexity, agent, multi-agent system, self-organization, modeling.

Серов М. Ю., Якуб Є. С. Застосування багатоагентного моделювання в економіці. Інформаційні технології в економіці і управлінні : зб. наук. студ. праць. Одеса : ONEU, 2023. Вип. 5. С. 146–153.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Процес моделювання економічних явищ та процесів представляє собою формалізацію складних економічних відносин, що дозволяє виявити особливості функціонування економічного об'єкту і на цій основі передбачати поведінку при зміні будь-яких його параметрів. У моделі всі взаємозв'язки змінних можуть бути оцінені кількісно, це дозволяє одержати більш точний і надійний прогноз.

Аналіз досліджень і публікацій останніх років. Ще у XIX столітті великий внесок у моделювання ринкової економіки внесла математична школа (Л. Вальрас, О. Курно, В. Парето, Ф. Еджворт та ін.). Поняття моделі застосовувалися з метою ілюстративних і дослідницьких цілей ще Ф. Кене, А. Смітом, Д. Рікардо. Особливо широко процес моделювання почали використовувати для дослідження економічних процесів і явищ ще в середині XX ст., коли виник ряд нових математичних напрямів і були створені інноваційні технології. Серед вітчизняних вчених варто відзначити В. К. Дмитрієва і Є. Є. Слуцького, Ю. А. Олійника, В. Ф. Пугачьова, Н. П. Федоренка, С. С. Шаталіна.

Мета статті. Мета статті – провести аналіз та дослідити досвід застосування багатоагентного моделювання в економіці.

Виклад основного матеріалу дослідження. Складні системи містять багато взаємопов'язаних компонентів, здатних впливати один на одного на основі свого стану або стану навколишнього середовища. Взаємодії між цими компонентами можуть призводити до виникнення явищ, які не є частиною цих окремих одиниць. Складність досліджується за допомогою різних підходів до моделювання.

Багатоагентні системи – це стохастичні та децентралізовані системи, які використовуються як вихідна парадигма моделювання для кращого розуміння цих складних систем. Цей підхід можна застосувати у вивченні поведінки економічних суб'єктів (споживачів, домогосподарств, компаній, конгрегацій або країн), які можуть демонструвати складну поведінку.

Агентно-орієнтована обчислювальна економіка (ACE) використовує обчислювальні інструменти для вивчення мікроекономічних або макроекономічних процесів для глибшого розуміння та ефективного впливу на економічні системи. ACE визначається відповідно як: «Числове дослідження економічних процесів, змодельованих як динамічні системи взаємодіючих агентів». Агентно-орієнтована парадигма є природним підходом до вивчення економічних процесів, оскільки вона здатна моделювати та імітувати велику кількість взаємодіючих сутностей, і вивчення адаптивних або самоорганізованих систем. Економіку можна сприймати як складну адаптивну систему, що розвивається. У цій статті досліджується досвід застосування багатоагентних систем для вивчення принципів самоорганізації та адаптивності у віртуальній економіці. Запропонована модель віртуальної економіки має бути модульною, а її складна поведінка має виникати через взаємодію великої кількості агентів. Ці агенти використовують стандартну економічну поведінку для досягнення своїх цілей, таких як максимізація прибутку або корисності, і здатні самоорганізовуватися в структури, що дозволяють обробляти ресурси в даному середовищі та створювати ланцюги виробництва та постачання з максимальною ефективністю. Незважаючи на те, що запропонована система в кількох аспектах спрощена – банківський сектор і уряд не включені в модель – представлена модель забезпечує корисну основу для дослідження механізмів адаптації та самоорганізації віртуальної економіки [1, С. 300–317].

Агентне моделювання та багатоагентне моделювання застосовуються для вирішення різних проблем, пов'язаних з економікою чи управлінням. Наприклад, платформа *Kasbah* розроблена в MIT Media Lab для автоматизації бізнес-процесів, наприклад продаж, купівля та переговори здійснюються лише автономними агентами. Користувач задає вихідні параметри для агентів (опис торгового продукту, ціни на продукти або прийнятну ціну на продукти). Проект *MAGMA* пропонує прототип віртуального ринку, на якому враховуються купівля, продаж, використання банківських послуг і реклама. Агенти також використовуються в моделі *VEMMA* – віртуальному електронному ринку з мобільними агентами, які можуть вести переговори про ціни на продукцію. Прийняття рішень автономними агентами базується на їхніх уподобаннях і локальних параметрах. Агентна архітектура для електронного бізнесу, де агенти продають і купують вибрані види фруктів, представлена Jain et al. [1, С. 300–317].

Багатоагентний підхід можна також використовувати для моделювання адаптивної поведінки фірм, які конкурують одна з одною на спільному ринку. Економічна багатоагентна система використовується в Vidal and Durfee для визначення, коли агент повинен поводитися стратегічно (тобто вивчати та використовувати моделі інших агентів), а коли він повинен діяти як простий оцінник. Їхні результати показують, як кмітливі покупці можуть уникнути обману з боку продавців, як нестабільність цін можна використовувати для кількісного прогнозування переваг глибших моделей і як певні типи сукупностей агентів впливають на поведінку системи. Damaseanu і Carpani зосередили свою увагу на банківському ринку. У своєму дослідженні вони проводять 11 комп'ютерних експериментів і вивчають еволюцію різних показників банківського ринку, таких як загальна сума грошей, заощаджень, гаманців або банківських резервів. Через свою складність Sinha досліджували та створили модель ланцюга постачання нафти. Розробили еволюційну модель динаміки обсягу виробництва та інвестицій, яка дає ендогенні бізнес-цикли. Модель описує економіку, що складається з фірм і споживачів. У той час як фірми належать до двох галузей, споживачі продають свою працю та споживають свій дохід. Результати моделювання показують, що модель здатна забезпечити самопідтримку зростання, які характеризуються наявністю ендогенних бізнес-циклів [2, С. 156–170].

У цій роботі наведено концептуальну модель віртуальної економіки. Модель представляє процеси виробництва та споживання в реальних економіках. Загальною метою є вивчення адаптивних принципів та принципів самоорганізації, які стоять за реальною економікою. Економічні принципи встановлення ефективної ціни та кількості в умовах певного попиту та обмежень потужності моделюються за допомогою багатоагентних систем. Основна увага приділяється торгівлі товарами, послугами та пропозиції роботи на ринку праці. Моделювання віртуальної економіки подібне до роботи Deguchi, однак у такому представленні розглянуті сутності є більш специфічними, створюючи більш складну мережу відносин, ніж це необхідно. Питання довіри, про які йдеться,

наприклад, у Gazda, і подібні проблеми не приділяють першочергової уваги нашій віртуальній економіці. Представлена модель віртуальної економіки складається з чотирьох типів автономних агентів:

- Споживач (С-агент).
- Фабрика (F-агент).
- Майнінг (M-агент).
- Транспорт (Т-агент).

Банківський і державний сектори не включені в модель через простоту і зрозумілість зв'язків. Базова архітектура моделі віртуальної економіки зображена на рис. 1.

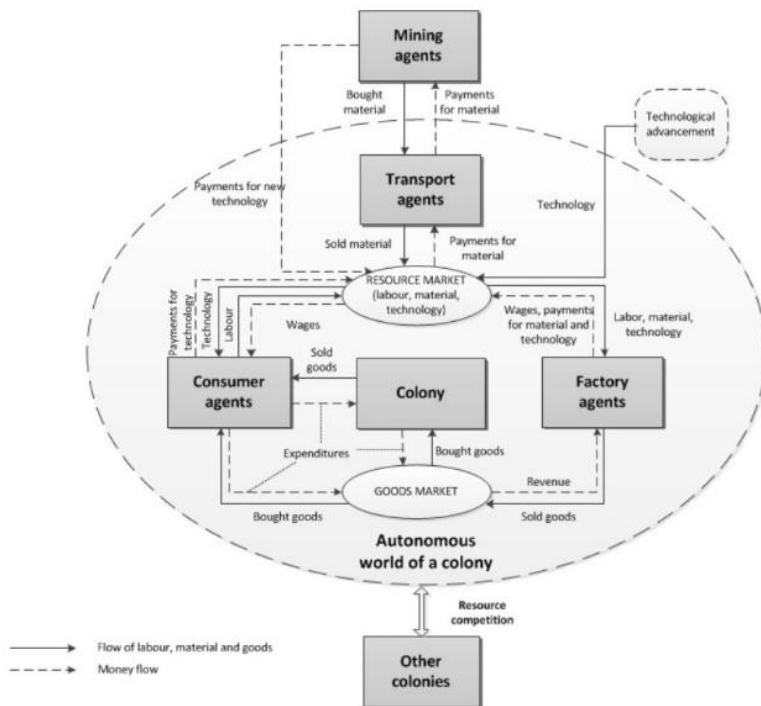


Рис. 1. Концептуальна модель запропонованої віртуальної реальності
Джерело: [3, с. 97]

Споживачі – суб'єкти господарювання, які споживають продукти та послуги (тобто товари) і пропонують роботу. Вони можуть купувати товари на основі свого багатства. Багатство цього агента є продуктом праці та кваліфікації (чим вища кваліфікація, тим швидше накопичується багатство). Споживчий агент робить компроміс між інвестиціями у вищу кваліфікацію і споживанням. Функція споживання втілює поєднання споживаних продуктів і швидкості споживання. Поєднання продуктів формує схему споживання, за якою можна розділити споживачів на три категорії:

- 1) споживачі з низьким рівнем доходу;
- 2) споживачі із середнім доходом;
- 3) споживачі з високим доходом.

Шаблон визначає співвідношення товарів, які купує агент-споживач. У нашій моделі розглядаються три види товарів: товари першої необхідності, нормальні та розкішні. Фабричний агент (компанія) несе відповідальність за перетворення входу на вихід (тобто матеріалів та інших продуктів у кінцевий продукт, який купує агент-споживач, або субпродукт, який використовується іншим підприємством-агентом). Функція споживання визначає матеріали та їх пропорції. Виробнича функція визначає портфель вироблених товарів. Виробництво потребує робочої сили, тобто залучення агентів-споживачів. Виробництво залежить від технологічного рівня e_f і кваліфікації робочої сили, тобто зайнятих споживачів e_c . Рівняння виробництва виглядає таким чином:

$$\sum_{i=1}^n k_i^{con} x_i + WF \rightarrow production \rightarrow e_c e_f \left(\sum_{j=1}^m k_j^{pro} y_j \right)$$

Майнінговий агент відповідає за перетворення ресурсів у сировину, яка використовується фабричними агентами для виробництва продуктів або послуг. Вартість майнінгу визначається функцією споживання, в якій відображено енергію та технології, необхідні для майнінгу. Кожен майнінговий агент постачає лише один вид сировини. Сировина, перетворена з ресурсів, зберігається, щоб потім продавати її транспортним агентам.

Транспортні агенти є посередниками між майнінговими та фабричними агентами. Вартість перевезення визначається відстанню. Завдання транспортного агента – знайти найекономніший маршрут у разі виникнення бар'єрів на дорозі. Продуктивність транспортного агента визначається швидкістю мобільності, потужністю та технологіями.

Транспортний агент не має багатства і купує матеріали від імені фабричного агента. Технологічний прогрес транспортного агента також такий же, як і для фабричного агента. Транспортний агент завжди закупає весь наявний матеріал в межах місткості транспортування. Транспортований матеріал, який не використовується безпосередньо у виробництві, зберігається на агентському складі заводу.

Запропонована модель віртуальної економіки містить також представлення суспільства агентів, яке в цьому контексті називається «колонією». Колонія являє собою компактне утворення споживачів, заводів і транспортних агентів. Змінні агенти не є частиною колонії. Вони поширюються в навколишньому середовищі в залежності від ресурсів, які переробляють. Колонія має дві основні характеристики: положення в середовищі та чисельність популяції. Колонії змагаються за ресурси, яких нібито мало. Успіх колонії можна виміряти багатством. Багатство колонії визначається сумою багатства всіх агентів. Через різну популяцію колоній порівняння між колоніями потребує обчислення багатства на агента. Формула така:

$$CW_{COL} = \frac{\sum_{i=1}^n (W_{C,i} + W_{F,i}) - W_{COL}}{p}$$

Користувач може встановлювати в основному кількість колоній (1–4), розмір кожної з колоній (1–100 С-агентів), положення колонії, кількість М-агентів (0–5), рельєф (тип перешкода), кількість (тип) джерел, виробничі ланцюги, кількість виходів, створених F-агентами. Розширення ACL FIPA, розроблене Іліасом Сакелларіу, використовується для моделювання зв'язку між агентами, оскільки чистий інструмент NetLogo підтримує лише реактивних агентів без спеціальної мови спілкування. Елементарні принципи координації, конкурентна поведінка під час управління джерелами, розподіл джерел, рівень життя або рівень фону можуть бути досліджені за допомогою цієї багатоагентної моделі.

Під час розробки моделі було виявлено кілька недоліків NetLogo. Більш складні моделі поведінки практично не впроваджуються, а довгострокове планування не може бути належним чином включено. GUI може бути хаотичним у разі великої кількості елементів керування або моніторингу (монітори, кнопки, поля введення/виведення, графіки, повзунки, перемикачі). Отже, для моделювання більш складної поведінки віртуальної економіки має бути обране інше багатоагентне середовище. Це може бути наприклад програмне забезпечення багатоагентного моделювання AnyLogic.

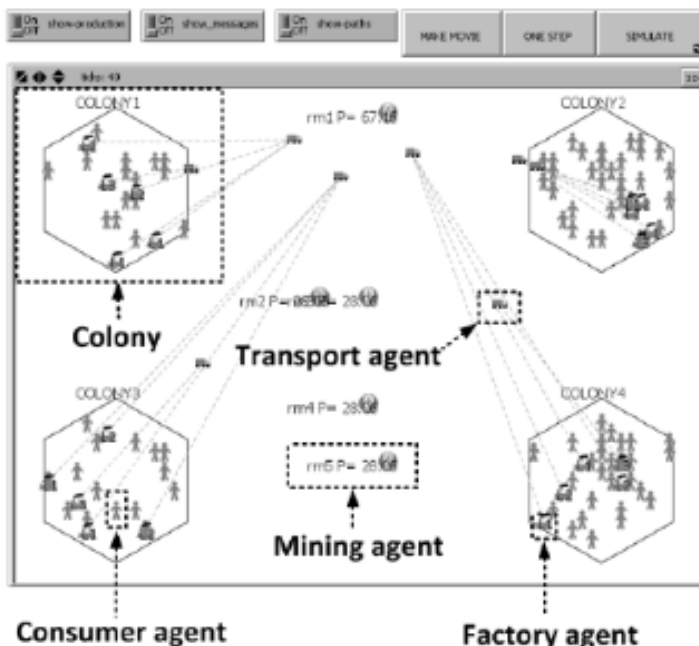


Рис. 1. Початкова модель віртуальної реальності NetLogo
Джерело: [4, С. 233]

Запропонована модель віртуальної економіки є спрощеною. Ринок капіталу, ринок праці чи державний сектор не є частиною початкової моделі. Подальші дослідження зосереджені на розробці більш складної моделі з різними стратегіями агентів та дослідженні ефективності спільнот агентів у різних умовах. Мета – дослідити здатність системи до самоорганізації за допомогою моделей поведінки з економічної теорії із застосуванням багатоагентного підходу. Остаточна модель має відповідати поведінці економічних суб'єктів у місті та сприяти розвитку концепції «розумного міста». Передбачувана система повинна мати такі атрибути:

- Стабільність: система повинна мати можливість підтримувати себе якомога довше, в ідеалі необмежений час;
- Ефективність: система повинна мати можливість оптимізувати розподіл ресурсів з урахуванням виробничих можливостей і забезпечувати потужність для відповідного розподілу продуктів;
- Адаптація та динамізм: система повинна бути здатною бути гнучкою через зміну умов середовища (тобто перерозподіл ресурсів або реорганізація її структури).

Реальні дані є важливою частиною багатоагентного моделювання. Потрібно мати модель, яка б максимально відображала реальність. Фактична модель NetLogo не базується на реальних даних. Реальні дані мають бути використані в подальшому.

База даних статистичного управління є основним джерелом реальних даних. Багато таблиць даних знаходяться у вільному доступі. Економічний контекст, у якому працює запропонована система, використовується для максимізації операційного потенціалу всієї багатоагентної системи. Такі економічні поняття, як «задоволеність споживачів» або «максимізація прибутку», чудово підходять для визначення цільових параметрів ефективності окремих суб'єктів у системі. Потім автономні суб'єкти (агенти) можуть прийняти різні стратегії для досягнення належного рівня ефективності своїх дій. Ми маємо намір досягти бажаної поведінки всієї системи за допомогою моделей поведінки, які виникнуть у результаті взаємодії великої кількості малих індивідуальних агентів один з одним. При цьому існують два етапи. На першому етапі досліджується випадок єдиної багатоагентної спільноти (колонії). Діяльність на першому етапі зосереджена на ефективності та продуктивності колонії та її здатності до самоорганізації. Друга фаза зосереджена на кількох колоніях, які взаємодіють з кожною іншою в даному середовищі. У середовищі буде декілька (або всі) ресурси, присутні лише в обмеженій кількості. У цьому випадку окремі колонії повинні домовитися про розподіл (або власність). Передбачається, що колонії будуть заохочуватися до спеціалізації у своєму виробництві відповідно до заданого розподілу ресурсів у середовищі. Це призведе до посилення взаємної залежності колоній одна від одної та підкреслить необхідність їх ефективної співпраці. Застосування сценаріїв, орієнтованих на максимізацію ефективності колоній одна проти одної, планується на завершальній фазі проєкту [5, С. 18–46].

Висновки з даного дослідження. Фактичний стан техніки багатоагентного моделювання показує, що існує сильна тенденція до формального визначення організаційних структур і політики в системах, що самоорганізуються. Багатоагентні системи є природною альтернативою для моделювання складних систем, що вивчаються також в економічній теорії. Початкова модель віртуальної економіки може бути розроблена в NetLogo, але реальна модель має бути більш складною, модульною, адаптивною та базуватися на реальних даних. Складна поведінка системи, що складається з окремих агентів прозорої архітектури, виникає з часом у результаті їхньої взаємодії. Визначаючи моделі споживання для споживчих агентів, вихідні дані системи можна модифікувати для виробництва вибраного типу товарів або послуг. Це дозволить вивчати та досліджувати широкий спектр сценаріїв за мінливих умов.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чугунов І. Я., Затонацька Т. Г., Ставицький А. В. Фінансово-економічне прогнозування і планування. К. : Поліграф-Консалтинг, 2017. С. 300–317.
2. Петров Е. Г., Новожилова М. В.. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах : навч. посіб. / за ред. Е. Г. Петрова. К. : Техніка, 2004. С. 156–170.
3. Brabenec M., Tučník P. (2012). Autonomous Systems in Virtual Economy Environment. University of Hradec Králové, Faculty of Informatics and Management, 97 p. Diploma thesis. Supervisor Petr Tučník.
4. Damaceanu R. C., Capraru B. S. (2020). Implementation of a Multi-Agent Computational Model of Retail Banking Market Using Netlogo. *Metalurgia International*. 17 (5). pp. 230–236.
5. Макроекономічне моделювання та короткострокове прогнозування / за ред. І. В. Крючкової. Харків : Форт, 2010. С. 18–46.