

# АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ

ГУЖВА В. М.

кандидат економічних наук

Київ

Серед теоретичного інструментарію в економіці найкраще представлені два види моделей. Перший з них створений для опису взаємодії людей на основі ринкових механізмів регулювання, що приводять ринкову систему до рівноваги за допомогою створення та розповсюдження цінкових сигналів, які подаються продавцями і покупцями товарів. Другий вид економічних моделей представлений в теорії менеджменту і описує взаємодії людей як реалізацію плану, яка стимулюється менеджером через різні системи заохочення і покарання працівників. В основі цього виду моделей лежить ієрархічний принцип організації взаємодій і розподілу відповідальності.

В останні роки активно розробляються та впроваджуються моделі соціально-економічної системи третього виду. Їх основу складає інформаційна поведінка агентів як складових частин соціально-економічних систем, яка пояснює, як агенти можуть координувати свою діяльність на основі прямого рівноправного обміну інформацією між собою. В її основі лежить ідея, що прагнення до рівноваги в економічній системі реалізується в результаті численних актів інформаційних взаємодій між агентами.

*Мета статті* – обґрунтування можливості використання агентно-орієнтованого моделювання для побудови соціально-економічних процесів і систем.

## СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНА СИСТЕМА ЯК СУКУПНІСТЬ АКТИВНИХ АГЕНТІВ

Останнім часом дедалі більшого поширення набуває методика моделювання соціально-економічних процесів і систем, основними дійовими особами яких є деякі активні елементи – «агенти», що володіють власною поведінкою.

Як зазначено в роботі (2), до числа основних видів об'єктів, поведінка і характеристики яких визначають функціонування будь-якої соціально-економічної системи, заснованої на інформаційних взаємодіях між її учасниками, відносяться: а) макротехнології; б) інформаційне середовище; в) інституційна структура; г) колективна модель середовища; д) людина-учасник.

Кожен з цих об'єктів може бути визначений як активний агент, тому що існування і функціонування кожного з них прямо або опосередковано підтримується певною специфічною діяльністю людини. Така структуризація видів об'єктів економічної системи заснована на виділенні специфічних видів діяльності людей і закріплення її за певними видами активних об'єктів економічної системи.

Для уникнення плутанини в термінах останній вид активного агента – людина-учасник – прийнято називати «сайзером». Цей новий термін – *сайзер* – запозичений з математичної генетики, де він позначає клас моделей, що самовідтворюються; такі моделі близькі до описуваної моделі поведінки «людини-учасника» економічної системи (1).

Основні особливості та функції кожного з п'яти виділених активних агентів описані в *табл. 1*.

Таблиця 1

Активні агенти (об'єкти соціально-економічної системи)	Особливості та функції активних агентів
1	2
Макротехнологія	Дозволяє сайзерам створювати ресурс для підтримки їх життєвих сил. Її характеризують параметри оптимального розподілу сайзерів по робочих місцях, досягнення якого дає сайзерам максимальний розмір потрібного ресурсу і тому є кінцевою метою їхньої поведінки. Досягнення оптимального розподілу сайзерів в економічній системі можна інтерпретувати як процес наближення системи до рівноваги
Інформаційний простір	Його параметри визначають розміри області вибору для інформаційних взаємодій кожного окремого сайзера. Область вибору включає підмножину сайзерів, доступних для взаємодії заданому сайзеру. Рівень розвитку інформаційно-комунікаційної техніки (ІКТ), з одного боку, та інтенсивність зміни стану об'єктів економічної системи, з іншого, задають розміри даного домену. Чим більш стабільним є стан сайзерів в часі, тим в більше число областей вибору вони потрапляють
Інституційна структура	Задає правила побудови додаткового підпростору для взаємодії сайзерів. Групи сайзерів можуть приймати угоди, які встановлюють верхню межу мінливості їх станів. Це дозволяє сайзерам створювати додаткові підпростори, в яких область вибору кожного окремого сайзера стає істотно ширшою.

1	2
	Таким чином, сайзери можуть розширювати межі своїх взаємодій один з одним і тим самим збільшувати ймовірність знаходження глобально оптимального розподілу по робочих місцях макротехнологій
Колективна модель середовища	Є інструментом взаємодії сайзерів. Підмножини сайзерів «бачать» один одного в своїх областях вибору (кожен «бачить» інших) і, отже, тут вони мають спільний інформаційний простір, в який вони можуть розмішувати для взаємного ознайомлення свої пропозиції щодо зміни займаних ними робочих місць макротехнологій. По закінченню терміну формування пропозицій щодо зміни розподілу сайзерів по робочих місцях спільнота бере до реалізації той варіант, який мав найвищу оцінку очікуваного від нього провадження ресурсу життєдіяльності
Множина учасників економічної діяльності (сайзерів)	Взаємодіють між собою з приводу і за допомогою вище перерахованих активних агентів. Сайзери вирішують завдання максимізації свого доходу, виражене у вигляді персональної частки від загального ресурсу, отриманого від колективного застосування макротехнологій. Кожен сайзер вирішує це завдання локально, програючи можливі варіанти зміни схеми розподілу по робочим місцям з іншими сайзерами, які доступні йому через його колективну модель середовища. За наявності декількох інституційних структур завдання максимізації доходу вирішується сайзером одночасно по всіх його підпросторах для взаємодій

Кожен з описаних видів активних агентів може бути представлений в теоретичній системі як невеликою кількістю представників (наприклад, від одного до кількох екземплярів макротехнологій або інституційних структур), так і дуже великою (наприклад, сайзери та їхні колективні моделі можуть обчислюватися десятками і сотнями).

На рис. 1 представлені зв'язки, які виникають між активними агентами в процесі функціонування економічної системи.

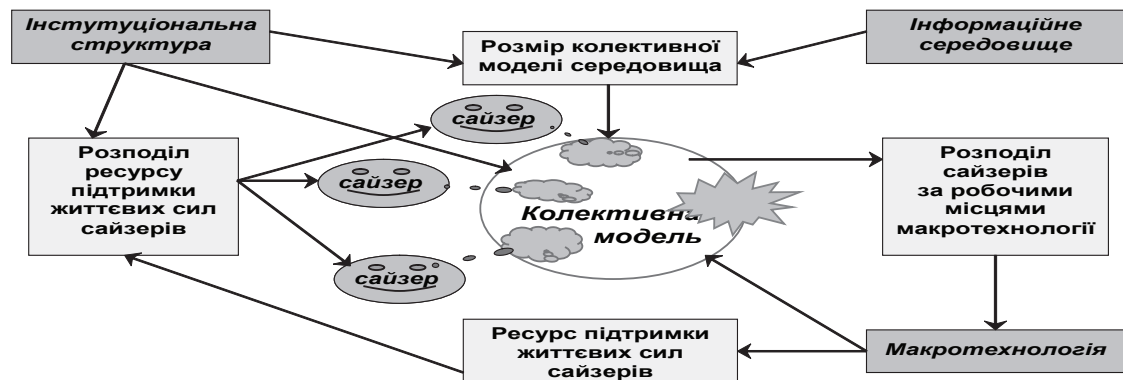


Рис. 1. Схема зв'язків між активними агентами

Об'єкти, назва яких представлена шрифтом-курсивом, на схемі відповідають активним агентам системи, а всі інші – це допоміжні об'єкти, що введені для відображення характеру зв'язків між агентами. Як видно з цієї схеми, центральним елементом системи є активний агент «колективна модель середовища». Даний агент містить відображення практично всіх інших видів агентів (макротехнологій, інституційну структуру, власне сайзерів), а його точність і межі показності (видимості) визначається агентом «інформаційне середовище».

Такий підхід до визначення активних агентів дозволяє співвіднести їх до області порівняно нового комп'ютерного моделювання соціально-економічних систем, яке

отримало назву «агентно-орієнтоване моделювання» (Agent-Based Simulation) (3).

### МЕТОДОЛОГІЯ АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНОГО МОДЕЛЮВАННЯ (АОМ)

АОМ – спеціальний клас обчислюваних моделей, що базуються на індивідуальній поведінці агентів та створюються для комп'ютерних симуляцій. В основі агентно-орієнтованих моделей лежать три основні ідеї:

1) *об'єктна орієнтованість*; 2) *здатність агентів до навчання (або їх еволюція)*; 3) *складність обчислень*.

Домінуючим методологічним підходом є підхід, при якому обчислюється рівновага або псевдорівновага системи, що містить в собі множину агентів. При цьому, власне моделі, використовуючи прості правила поведінки, можуть видавати вельми цікаві результати. АОМ складаються з агентів, що динамічно взаємодіють за певними правилами. Середовище, в якому вони взаємодіють, може бути достатньо складним.

Основними властивостями агентів в АОМ є: 1) *інтелектуальність*; 2) *наявність життєвої мети*; 3) *розташування в часі і просторі*. (Мається на увазі де-

яке «місце існування», яке може бути представлена і у вигляді ґрат, так і у вигляді набагато складнішої структури. Інколи результат взаємодії агентів в «місці існування» – рівновага, інколи – безперервний процес еволюції, а інколи – нескінченний цикл без певного рішення.

З середини 1990-х років АОМ стали використовувати для вирішення широкого спектру комерційних і технологічних проблем. Прикладами можуть послужити завдання: а) оптимізації мережі постачальників і логістика; б) моделювання споживчої поведінки (у тому числі соціальні мережі); в) розподілених обчислень; г) менеджменту трудових ресурсів; д) управління транспортом; е) управління інвестиційними портфелями тощо.

У цих та інших додатках стратегії поведінки визначаються з урахуванням поведінки множини індивідуальних агентів-атомів і їх взаємодій. Таким чином, АОМ можуть допомогти у вивченні впливу індивідуальної поведінки агентів на еволюцію всієї системи.

### ПОБУДОВА АГЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ

Побудова агентних моделей здійснюється здебільшого так, як і побудова будь-якої іншої моделі в процесі моделювання.

Автори роботи (4) відзначають характерні риси в побудові агентних моделей. На додаток до стандартних задач побудови моделі, практичне АМ потребує виконання таких кроків:

- ✦ визначення агентів і теоретичних основ поведінки агентів;
- ✦ визначення взаємовідносини між агентами і теоретичних основ таких відносин;
- ✦ пошук платформи для АМ і розробка стратегії АМ моделі;
- ✦ отримання необхідних даних для агентів,
- ✦ перевірка (етап валідації) моделі поведінки агентів (на додаток до всієї моделі в цілому);
- ✦ запуск моделі та аналіз вихідних даних з точки зору зв'язку між поведінкою агентів на мікрорівні та поведінкою всієї системи в цілому.

### ЗАСОБИ РОЗРОБКИ СИСТЕМ АОМ

Агентно-орієнтоване моделювання може бути реалізовано на невеликих, настільних комп'ютерах, або з використанням великих кластерів комп'ютерів, або ж на будь-якому іншому варіанті між першими двома.

1) **Настільне АОМ.** Настільні агентні моделі можуть бути простими. Вони можуть бути використані для навчання тому, як моделювати з використанням агентів, протестувати концепції розробки агентних моделей та проаналізувати результати. Для побудови агентних моделей використовують електронні таблиці (зокрема, Excel) та математичні обчислювальні системи (МВС) такі, як Mathematica і MATLAB. Застосування настільних АМ систем обмежено максимальною кількістю керованих агентів, яке зазвичай знаходиться в діапазоні від кількох десятків до кількох сотень.

2) **Великомасштабне АОМ.** Великомасштабне АОМ розширює можливості простих агентних настільних моделей і дозволяє більшій кількості агентів (від ти-

сяч до мільйонів) брати участь у складних взаємодіях. Великомасштабне агентне моделювання зазвичай виконується з використанням спеціальних середовищ моделювання. Ці середовища традиційно включають в себе: а) планувальника (за часом); б) механізми комунікації; в) гнучкі топології взаємодій агентів; г) широкий вибір пристроїв для зберігання і відображення стану агентів. До такого класа середовищ можна віднести Repast, Swarm, NetLogo, MASON, AnyLogic та ін. (3-4).

Розглянемо приклади використання АОМ для моделювання процесів в економічній сфері.

### АГЕНТНО-ОРІЄТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАНЬ НА ПІДПРИЄМСТВАХ

Ланцюг постачань складаються з чотирьох частин: виробництво, дистриб'ютори, оптові торговці та роздрібні торговці, які відповідають на запити кінцевих споживачів.

Для спрощення моделі пропонується наступні умови: 1) існує тільки один продукт, 2) не відбуваються перетворення товарів і 3) неприпустимим і не потрібним є складання різних матеріалів в кінцевий продукт.

Агентами в рамках ланцюгів постачань виступають споживачі (*customers*), роздрібні торговці (*retailers*), оптові торговці (*wholesalers*), дистриб'ютори (*distributors*) та виробники (*factories*) (рис. 2). У кожний період часу агенти ланцюгів постачань виконують дії, керуючись наступними правилами своєї поведінки:

- 1) споживач подає заявку роздрібному торговцю;
- 2) роздрібний торговець задовольняє заявку негайно з відповідних запасів, якщо має достатньо запасів на складі (якщо запаси закінчилися, то заявка споживача поміщається в невиконані і виконується за умови поповнення складу);
- 3) роздрібний торговець отримує чергову партію вантажу від оптового торговця у відповідь на попередні заявки. Роздрібний торговець вирішує, скільки вантажу замовити оптовому торговцю, ґрунтуючись на «правилах заявок». Він також оцінює майбутні замовлення споживачів, використовуючи правила «прогнозу вимог (заявок)». Потім роздрібний торговець замовляє товар у оптового торговця, щоб покрити очікувані вимоги і будь-який дефіцит щодо запасів і цілей, які задаються явно;
- 4) аналогічно кожен оптовий продавець отримує товар від виробника та подає заявки дистриб'юторам, ґрунтуючись на заявках роздрібних торговців. Цей процес продовжується далі вгору по ланцюжку до виробника, який вирішує, скільки виробити продукції.

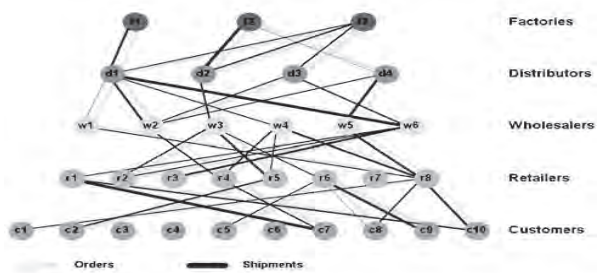
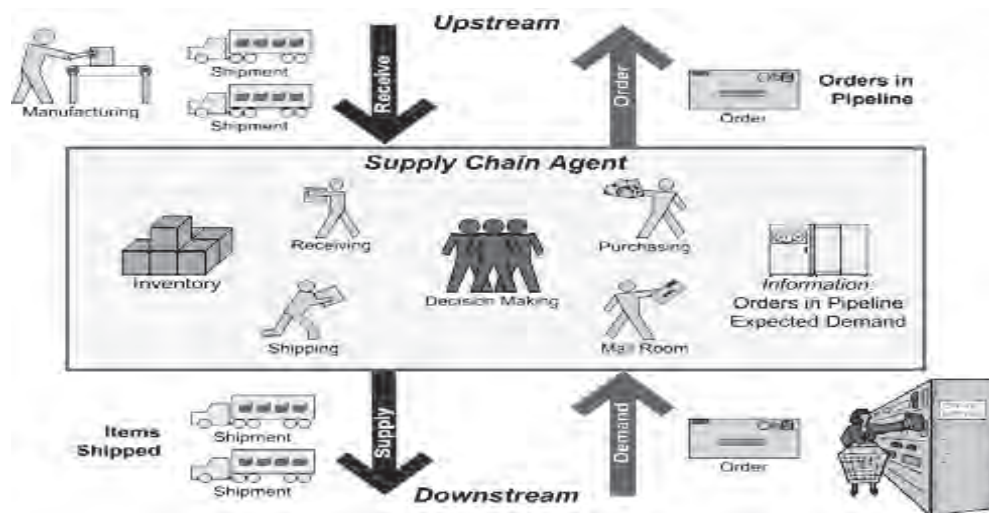


Рис. 2. Типова мережа ланцюгів постачань та агенти (orders – замовлення; shipments – вантажі (товари))



Метою агентів в цьому моделюванні є управління їх власними запасами таким чином, щоб мінімізувати їх вартість за допомогою раціональних рішень, що ґрунтуються на тому, скільки товару слід замовляти в кожний період часу. Коли запаси практично незначні і існує загроза їх спустошення, агенти замовляють більше; коли запасів занадто багато і агенти несуть великі витрати на зберігання цих запасів, вони замовляють менше товарів. Кожен агент несе витрати на зберігання товару на складі. Агенти також несуть накладні витрати, коли вони отримують заявку (замовлення) і не можуть її відразу ж виконати через відсутність запасів на складі. Кожен агент робить вибір між занадто великими запасами на складі, які збільшують витрати на зберігання, і занадто маленькими запасами на складі, що збільшує ризик того, що закінчатся товари і йому доведеться нести накладні витрати. На *рис. 3* наведено схему інформаційних і товарних потоків агента оптової торгівлі при його функціонуванні в рамках ланцюга постачань.



**Рис. 3.** Схема потоків (інформаційних та товарних), яка відображає функціонування агента оптової торгівлі в рамках ланцюга постачань

У цьому прикладі агенти ланцюгів постачань мають доступ тільки до локальної інформації. Ніхто з агентів не бачить всього ланцюга постачань або не може оптимізувати всю систему в цілому. Адаптивні правила прийняття рішень агентів використовують тільки локальну інформацію для прийняття рішень.

**АГЕНТНО-ОРІЄТОВАНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЯЛЬНОСТІ НА ФОНДОВОМУ РИНКУ**

Суть використання агентно-орієнтованої моделі на фондовому ринку зводиться до того, що така модель приймає котирування фондових інструментів та генерує цінові прогнози, а торгівельна система вирішує, коли необхідно давати новий торговий сигнал на купівлю/



**Рис. 4.** Схема використання агентно-орієнтованої моделі на фондовому ринку

продаж на основі прогнозів та торговельних уподобань користувача (*рис. 4*) (5).

Агентно-орієнтована модель (АОМ) складається з сукупності (популяції) агентів і віртуального ринку (ВР), де агенти можуть торгувати цінними паперами. Агент – автономна сутність, що представляє трейдера (або інвестора) зі своїми власними активами (у грошовій формі та/або у формі цінних паперів) та своєю власною торговельною стратегією.

Цикл функціонування АОМ представлений на *рис. 5*.

Отримавши новий набір котирувань (прайс-лист), агенти проводять оцінку та можуть розмістити нові накази на купівлю/продаж чи залишитися неактивними в залежності від власної торгової стратегії. Після того, як всі агенти оцінять свою торговельну стратегію, віртуальний ринок визначає ціни посередництва (клірингові ціни або ціни ВР), виконує всі виставлені накази щодо купівлі/продажу та представляє прогноз цін на наступний період.

**ВИСНОВКИ**

До недавнього часу для моделювання соціально-економічних процесів і систем в основному використо-



**Рис. 5.** Цикл функціонування агентно-орієнтованої моделі на фондовому ринку

увалися два види моделей. Суть першого з них зводилася для опису взаємодії людей на основі ринкових механізмів регулювання, що приводять ринкову систему до рівноваги за допомогою створення та розповсюдження цінкових сигналів, які подаються продавцями і покупцями товарів. В основі моделей другого виду лежить ієрархічний принцип організації взаємодій і розподілу відповідальності в рамках соціально-економічних систем.

У статті обґрунтовується можливість використання моделей третього виду для дослідження соціально-економічних систем. Їх засади складає інформаційна поведінка агентів як складових частин соціально-економічних систем, яка пояснює, як агенти можуть координувати свою діяльність на основі прямого рівноправного обміну інформацією між собою. В її основі лежить ідея, що прагнення до рівноваги в економічній системі реалізується в результаті численних актів інформаційних взаємодій між агентами. Такий вид моделювання отримав назву агентно-орієнтованого моделювання (АОМ). У роботі розглядаються основні моменти, пов'язані з АОМ – суть, основні кроки, класи інструментарію та приклади практичного застосування в економічній сфері. ■

## ЛІТЕРАТУРА

**1. Ратнер В. А., Шамин В. В.** Сайзеры: моделирование фундаментальных особенностей молекулярно-биологической организации. Соответствие общих свойств и конструктивных особенностей коллективов макромолекул // Журнал общей биологии.– 1983.– Т. 44.– № 1.– С. 51 – 61.

**2. Швецов И. Е., Нестеренко Т. В., Старовит С. А.** ТАО – технология активных объектов для разработки многоагентных систем. Информационные технологии и вычислительные системы No. 1.– Москва: РАН, 1998.– С. 35 – 44.

**3.** General software and toolkits. Agent\_Based Computational Economics (ACE) and Complex Adaptive Systems (CAS).– Электронный документ.– Режим доступа: [www.econ.iastate.edu/tesfatsi/acecode.htm](http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/acecode.htm).

**4. Dunham J. B.** An Agent\_Based Spatially Explicit Epidemiological Model in MASON. // Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2005, vol. 9, no. 1.

**5. Гужва В. М.** Агентно-орієнтоване моделювання процесів на фондовому ринку // Вісник Черкаського університету ім. Богдана Хмельницького, Серія економічні науки.– Черкаси, 2010.– № 187. – С. 70 – 78.