

УДК 519.7

Д.А. ОМЕЛЬЯНЧИК

АГЕНТНО-ОРІЄНТОВАНІ МОДЕЛІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ЕКОНОМІКИ: ОСОБЛИВОСТІ, ПЕРЕВАГИ І НЕДОЛІКИ

***Анотація.** Розглядаються основні підходи до розробки агентно-орієнтованих моделей обчислювальної економіки. Визначаються характерні риси агентно-орієнтованих моделей (АОМ). Наводяться основні цілі створення агентно-орієнтованих моделей. Пояснюються деякі способи класифікації АОМ та виділяються базові типи АОМ. Обговорені основні переваги та недоліки АОМ. Наведено короткий огляд моделі EURACE.*

***Ключові слова:** математичне моделювання, агентно-орієнтоване моделювання, математична економіка, інтелектуальні економічні і соціальні агенти.*

Вступ

Агентно-орієнтоване моделювання економіки – це галузь міждисциплінарних досліджень, що використовує методи поведінкової економіки, теорії мереж, імітаційного моделювання, теорії хаосу, а також ідеї, запозичені з фізики, когнітивної психології, біології та інших природничих та соціальних наук [1]. За допомогою методів комп'ютерних наук розробники агентно-орієнтованих економічних моделей намагаються створити таку комп'ютерну симуляцію реального світу, в якій можна буде перевіряти наслідки різних сценаріїв дій та вибирати оптимальний напрям, прогнозувати розвиток економічних систем, аналізувати причинно-наслідкові зв'язки між змінними. Предметом агентно-орієнтованого моделювання є питання прийняття оптимальних рішень відповідальними особами при уявленні про економіку як складну адаптивну систему, поведінка якої формується за рахунок множинних взаємодій агентів, що мають різну поведінку, здатність до навчання та є гетерогенними за своєю природою.

Мета статті – розглянути ряд перспективних напрямів у розробці та дослідженні агентно-орієнтованих моделей (АОМ), а також особливості, компоненти та види зазначених моделей обчислювальної економіки.

1. Що таке агентно-орієнтовані моделі обчислювальної економіки?

Перша АОМ була розроблена ще в кінці 1940-их років, проте в соціальних системах агентно-орієнтований підхід вперше почав застосовувати лауреат Нобелівської премії Т.Шеллінг. Він запропонував АОМ расової сегрегації населення міст та узагальнив отримані результати в книзі «Мікромотиви та макроповедінка» (1978). Широкого розповсюдження АОМ набули у 1990-их роках через бурхливе зростання обчислювальних потужностей.

Агентно-орієнтована обчислювальна економіка – це дисципліна, що вивчає економічні процеси, які моделюються за допомогою динамічних систем взаємодіючих агентів. Під «агентом» тут розуміється сутність, яка є основним елементом штучного суспільства та характеризується набором ознак (даних) і методів поведінки. Можливими прикладами агентів є індивіди (споживачі, робітники), соціальні групи (сім'ї, фірми, урядові агенції), інститути (ринки, регуляторні системи), біологічні (посіви, худоба, ліси) та фізичні (інфраструктура, погода, географічний регіон) сутності. Таким чином, діапазон можливих агентів включає як активні об'єкти, що збирають дані, приймають рішення і мають здатність навчатися, так і пасивні сутності без когнітивних можливостей. Крім того, агенти можуть складатися з інших агентів, утворюючи ієрархічні конструкції. Наприклад, агент-фірма може складатися з агентів-працівників.

Розробник АОМ задає початковий стан економічної системи, визначаючи для кожного агенту його початкові характеристики та методи поведінки, а також ступінь доступності цієї інформації для інших агентів. Дані (або характеристики) агенту можуть включати атрибути типу (світ, ринок, фірма, споживач), структурні атрибути (географічне положення, функція витрат, функція корисності) та інформацію про атрибути інших агентів (зокрема, їхні адреси). Методи агентів можуть бути соціальними (наприклад, ринкові протоколи) та приватними. Прикладами останніх є стратегії виробництва та ціноутворення, алгоритми навчання з метою оновлення стратегій та методи зміни методів. Підсумкова АОМ має бути динамічно повною. Це означає, що змодельована система повинна розвиватися в часі виключно шляхом взаємодій її агентів, без подальших втручань розробника [2].

2. Характерні риси АОМ

АОМ мають ряд особливостей, які відрізняють їх від інших математичних моделей. Їм притаманні такі основні риси:

– Погляд «знизу догори». Макродинамічні властивості можна правильно зрозуміти тільки як результат мікродинаміки агентів. Агреговані властивості виникають в результаті повторюваних взаємодій між простими агентами, а не внаслідок вимог раціональності та рівноваги, як припускається в класичних моделях.

– Гетерогенність. Агенти завжди неоднорідні за всіма характеристиками.

– Нелінійність. Характер взаємодій між агентами нелінійний, а, отже, і характер зв'язку між рівнем моделі та макрорівнем також нелінійний.

– Ендогенність взаємодії між агентами. Рішення, що приймаються агентом в поточний момент часу за допомогою механізму адаптивних очікувань, залежить від рішень решти агентів у попередні моменти часу.

– Обмежена раціональність. Через надзвичайну складність середовищ взаємодії економічних агентів припущення про раціональність є не вірогідним. Агентам надаються, щонайбільше, деякі локальні і часткові (у просторі й часі) принципи раціональності, або «міопічні» оптимізаційні правила.

– Здатність до навчання. Агенти в моделі навчаються за допомогою нескінченного пошуку в динамічних середовищах. Початково агенти не

наділені жодними знаннями про структуру середовища, але вони мають здатність розвинути своє уявлення про неї. Введення нових об'єктів змінює цю структуру, а, отже, й винагороду за дії агентів, що підтримує нескінченність пошуку.

– Істинна невизначеність. АОМ характеризуються незворотною динамікою: стан системи розвивається залежно від пройденої траєкторії, що частково є наслідком адаптивних очікувань, оскільки агенти володіють інформацією про минуле та формують на її основі очікування майбутнього.

– Постійні ендogenous інновації. Соціально-економічні системи завжди нестационарні. Неперервне створення нового в цих системах і формування нових типів поведінки є силою, що стимулює навчання та адаптацію агентів.

– Самоорганізація. Завдяки циклам зворотного зв'язку в АОМ може виникати самоорганізація агентів. Вони можуть утворювати такі структури, як підгрупи або локальні мережі агентів. В таких структурах окремі члени популяції агентів у певному сенсі стають ближчими до одних індивідів соціально-економічного простору, ніж до інших. Ці структури взаємодії самі можуть ендogenous змінюватися у часі, оскільки агенти самі стратегічно вирішують з ким взаємодіяти, орієнтуючись на очікувану винагороду.

– Механізми ринкового відбору. Агенти, як правило, проходять через механізм ринкового відбору. Критерії селекції можуть бути складними і багатовимірними [3].

3. Цілі створення та застосування АОМ

Основними цілями створення та застосування АОМ вважаються [5]:

– Емпіричне знання. Якщо дослідник ставить за мету емпіричне пізнання світу, він шукає відповідь на таке запитання: Чому окремі масові закономірності виникають і зберігаються навіть за відсутності контролю згори? Прикладом таких закономірностей є овації у театрі, соціальні норми, торгові мережі тощо. Пояснення цих явищ може полягати у повторюваності взаємодій агентів, що функціонують в специфічних середовищах;

– Нормативне знання. Яким чином можна використовувати АОМ в якості інструменту пошуку ефективних механізмів? Дослідники, що переслідують цю мету, намагаються оцінити, наскільки добре запропонований механізм дозволяє досягти суспільно бажаного результату в галузі соціальної політики, або в роботі різних інституцій чи процесів. Прикладами таких механізмів є системи аукціонів, правила голосування та введення в дію законів. Штучний «світ» будується так, щоб зафіксувати найбільш значимі аспекти функціонування соціальної системи в рамках розробленого механізму. Потім цей «світ» населяють агентами з власною мотивацією та здатністю до навчання і спостерігають за його розвитком у часі. Ключовим питанням є межі, в рамках яких отримані результати будуть ефективними та справедливими, незважаючи на спроби окремих агентів отримати індивідуальні переваги шляхом застосування стратегічної поведінки;

– Евристика. Як дізнатися більше про фундаментальні причинні механізми динаміки соціальних систем? Навіть якщо припущення моделювання доволі прості, наслідки їх застосування у складних системах можуть бути зовсім не очевидними. Ефект взаємодії багатьох агентів часто є

несподіваним, оскільки усі наслідки, навіть найпростіших форм взаємодії, дуже важко передбачити;

– **Методологія.** Яким чином забезпечити дослідників АОМ методами та інструментами, необхідними для кількісного дослідження соціальних систем за допомогою контрольованих обчислювальних експериментів, та встановити відповідність експериментально обґрунтованих теорій реальним даним? Існує багато способів досягти цієї мети: від ретельного розгляду методологічних принципів до практичної розробки засобів програмування, візуалізації та емпіричної валідації.

4. Таксономія АОМ

В роботі [6] АОМ пропонується класифікувати за такими характеристиками.

1. **Природа досліджуваного об'єкту.** Під нею розуміють загальні факти (зафіксовані емпірично), які дослідники намагаються пояснити за допомогою моделі. Наприклад, одні моделі вивчають якісні зміни в економічних системах під впливом витрат на дослідження та розробку, а інші – кількісні особливості статистики сукупного зростання, зокрема, автокореляційні зв'язки. Існують відмінності й між моделями, які намагаються пояснити окреме явище (наприклад, сукупне зростання), і моделями, що вивчають множинні явища (наприклад, взаємну залежність сукупного зростання, продуктивності праці та інвестицій). Останні можуть розглядатися в короткостроковому або довгостроковому періоді. Нарешті, можуть досліджуватися мікророзподіли (наприклад, розмірів фірм) або макроагрегати (наприклад, часові ряди показників національної або світової економіки).

2. **Мета аналізу.** Як правило, АОМ *достовірні в рамках вибірки*, їхня головна задача – відтворити статистичні властивості ретроспективних даних. Моделі, орієнтовані на вирішення питань управління, прогнозування або передбачення наслідків сценаріїв дій, зустрічаються рідше.

3. **Припущення моделювання.** Деякі моделі можуть мати багато ступенів свободи, інші – ні. Наприклад, правила прийняття рішень агентами АОМ можуть характеризуватися багатьма змінними і параметрами. З іншого боку, їх можна описати коротко і просто. Аналогічно, структура взаємодій може бути зафіксована ззовні, а може змінюватися екзогенно або ендогенно. В одних моделях час може бути дискретним і розривним, а в інших – паралельним та асинхронним. В залежності від правил прийняття рішень агентами, АОМ поділяються на адаптивні або оптимізуючі та детерміністські або стохастичні.

4. **Метод аналізу чутливості моделі.** Аналіз чутливості моделі, щонайменше, має дати відповідь на питання, яким чином результати залежать від: мікро і макро параметрів; початкових умов; мінливості, викликані стохастичними елементами (наприклад, випадковими індивідуальними правилами прийняття рішень). Загалом, аналіз чутливості передбачає ретельне вивчення змін на виході моделі від збурень на її вході. Таким чином, крім квантування простору параметрів та початкових умов, дослідники мають перевірити робастність результатів щодо змін у: розподілі випадкових величин, які генерують системний шум; механізмі визначення часу (та оновлення); рівні агрегування мікроекономічних змінних.

В [7] АОМ пропонується класифікувати з точки зору емпіричної валідації, причому різницю між класами моделей можна зрозуміти, виходячи з мети моделювання.

Кейс-моделі є моделями емпірично обмеженого явища із власною специфікою у просторово-часовому вимірі. Наприклад, дослідження ринку риби в місті Марсель, спрямоване на детальне відтворення функціонування ринку таким чином, щоб повніше зрозуміти його характерні особливості.

Моделі типізації вивчають специфічні класи емпіричних явищ і намагаються дослідити деякі теоретичні властивості, притаманні більш або менш широкому діапазону емпіричних явищ. Наприклад, припущення про те, що ринки риби, приналежні до одного класу, мають спільні риси, орієнтує модель на виявлення спільних властивостей ринків риби, припустимо, Французької Рив'єри або всього Середземномор'я.

Теоретичні абстракції є «чистими» теоретичними моделями, не прив'язаними ні до конкретного емпіричного явища, ні до окремого класу явищ. Наприклад, метою моделювання може бути визначення характерних рис механізму «голландського» аукціону, що діє на більшості ринків риби. Така модель спрямована на вивчення цього інституту, його ефективність в процесі швидкого розподілу цін та обсягів швидкопсувних товарів, зокрема, риби.

5. Переваги АОМ

Використання АОМ для дослідження складних адаптивних соціальних систем має певні переваги порівняно з традиційними методами, основними з яких є:

Компромід між гнучкістю та точністю. Гнучкістю є здатність моделі пояснити широкий клас можливих задач, тоді як точність вимагає конкретного і детального визначення всіх елементів моделі. АОМ забезпечує компромід між точністю та гнучкістю, дозволяючи відтворити безліч варіантів поведінок з достатньою математичною точністю.

Орієнтованість на процес. Традиційні економіко-математичні методи часто уникають деталізації відображення економічних процесів. Натомість, природа АОМ вимагає високого рівня точності опису процесів, які лежать в основі функціонування моделі. Для запуску обчислювальної моделі потрібно визначити всі значимі аспекти існування та взаємодії агентів.

Адаптивні агенти. Особливий науковий інтерес викликає питання про те, яким чином обмеження на здатність агентів раціонально обробляти інформацію впливає на поведінку соціальних систем. Не менш важливо оцінити вплив механізмів навчання в таких системах. АОМ можуть допомогти знайти відповідь на ці питання.

Природна динаміка. Більшість існуючих аналітичних інструментів економічного моделювання уникає питань про динаміку процесу і зосереджується на дослідженні станів рівноваги. Тоді як для більшості складних адаптивних соціальних систем стан рівноваги є скоріше винятком, ніж правилом. Агентні моделі пропонують більш природний спосіб аналізу динамічної поведінки системи. Незалежно від наявності рівноваги, саме особливості динаміки системи мають практичний інтерес для передбачення її розвитку.

Гетерогенність агентів та асиметрія. Припущення про гомогенність (однорідність) агентів та симетрію системи значно спрощують обчислення, тому вони часто застосовуються, незважаючи на те, що асиметрія та гетерогенність є природними властивостями соціально-економічних систем. В силу своєї природи АОМ дають змогу легко реалізувати припущення про неоднорідність агентів та асиметрію обробки інформації.

Масштабованість. Традиційні методи, як правило, зосереджуються на моделях, що містять або дуже мало, або нескінченно багато агентів. Проміжні випадки аналітично розв'язати дуже складно, тому зазвичай використовують обчислювальні методи. Тоді як в АОМ процес масштабування відбувається дуже легко. Щойно поведінку окремого агента описано, дослідити поведінку системи агентів необхідного масштабу можна додавши потрібну кількість агентів.

Повторюваність та відновлюваність. Можливості АОМ під час здійснення експериментів важко переоцінити. Здатність відновити початковий стан системи і повернутися на попередні кроки, щоб виявити причину появи поведінкових аномалій, сприяє швидкому удосконаленню теоретичних припущень. В свою чергу, повторюваність, тобто можливість множинних спостережень за поведінкою «ідентичних» систем, дає змогу проводити експерименти з точністю, недосяжною в реальних умовах.

Конструктивність. Природа АОМ дає можливість отримати конструктивні «доведення» припущень. Наприклад, якщо в результаті експериментів з АОМ, вдалося зафіксувати виникнення певного макроявища, один набір мікроумов, достатній для виникнення зазначених макроефектів, вже знайдено.

Низька вартість. Агентні моделі є економічно ефективними. Хоча розробка початкової версії АОМ може бути затратною, гранична вартість запуску чи модифікації готової моделі, як правило, не велика.

6. Недоліки АОМ

Незважаючи на зростаюче використання обчислювальних моделей для отримання теоретичних результатів, деякі дослідники досі виступають проти цього підходу. В наукових дискусіях зазвичай використовують такі аргументи [8]:

Результати експериментів з АОМ заздалегідь визначені. Часто вважається, що результати роботи АОМ напряму залежать від початкових даних і відомі заздалегідь, а, отже, отримати щось нове з їхньою допомогою неможливо. Дійсно, будь-яка модель не здатна самостійно розширити власні рамки, однак це не означає, що за її допомогою неможливо поліпшити теоретичне розуміння досліджуваної проблеми.

АОМ не вистачає строгості. На початкову постановку задач, які можна вирішити аналітичними методами, накладаються жорсткі обмеження, тоді як постановка АОМ можлива з невеликою кількістю обмежень. Хоча останнє й може бути джерелом недостатньої строгості, потенційна відсутність обмежень на постановку задач є вагомою перевагою. Зважаючи на новизну агентно-орієнтованого підходу, загальноприйнятий та узгоджений набір стандартів розробки АОМ для забезпечення достатньої математичної строгості, ще має з'явитися.

Результати АОМ є лише наближеними і залежать від конкретних початкових умов. Часто результати роботи АОМ неможливо прямо перевірити на точність. Проте, враховуючи потенційно високу вартість отримання точних результатів, спиратися на наближені результати є практично прийнятним.

АОМ занадто чутливі. Вважається, що АОМ є занадто чутливими до незначних змін вхідних параметрів. Чутливості обчислювальних моделей можна запобігти за допомогою простої та наочної структури. Цього результату можна також досягти завдяки кільком альтернативним реалізаціям ключових елементів моделі.

АОМ важко перевіряти та тестувати. Через залежність траєкторій розвитку, множинні стани рівноваги, наявність позитивного зворотного зв'язку або відсутність рівноваги тестування багатьох АОМ може бути дуже складним. Емпіричне тестування АОМ потребує розробки нових методів статистичного аналізу. Багато дослідників для перевірки аналізують ключові часові та просторові закономірності, які виникають в моделі.

АОМ – важкі для розуміння. АОМ часто відкидають через складність повного розуміння структури моделі та її рушійних сил. Частково це пов'язано з відсутністю загальноприйнятих засобів опису обчислювальних моделей. Тому розробники АОМ прагнуть до створення простих, легко пояснюваних моделей. В основу будь-якої АОМ доцільно закладати простий набір базових припущень. Адже саме вони формують модель, а не апарат, що їх використовує.

7. Приклад АОМ – модель EURACE

Базова модель EURACE [9, 10] складається з блоків, що відповідають ринку інвестиційних товарів, ринку споживчих товарів та ринку праці. У моделі також представлено два типи активних агентів (фірми-виробники споживчих товарів і домогосподарства) та два типи пасивних агентів (фірми-виробники інвестиційних товарів і торговельні центри). Пасивні агенти не приймають жодних рішень. Кожен активний агент має кілька ролей, відповідно до своєї діяльності на різних ринках. Так, на ринку споживчих товарів домогосподарство виступає покупцем, а фірма-виробник – продавцем, тоді як на ринку праці вже домогосподарство продає свою працю фірмам-виробникам. Зауважимо, що торговельний центр в моделі виступає не як підприємство, орієнтоване на отримання прибутку, а як деяка локальна платформа для продажу і зберігання споживчих товарів.

Економіка складається з двох регіонів ($R=2$), і кожний агент характеризується розташуванням в одному з них. Деякі дії відбуваються на локальному рівні (наприклад, споживання агентів), інші – глобально (наприклад, продаж інвестиційних товарів або пропозиція праці). Мінімальною одиницею часу є день, однак більшість взаємодій та рішень повторюються щомісячно.

За допомогою зазначеної моделі автори намагалися проаналізувати ефект від заходів, спрямованих на покращення професійних навичок працівників. Розглянемо основні компоненти моделі EURACE детальніше.

Ринок інвестиційних товарів. Існує єдина технологія виробництва інвестиційних товарів. Пропозиція інвестиційного товару не обмежена. Зміна якості інвестиційного товару q_t^{inv} в часі є стохастичним процесом. Кожного періоду якість зростає з ймовірністю $\gamma^{inv}m(0,1)$. У випадку покращення якості, кількість пропонованого товару зростає на Δq^{inv} . Ціна інвестиційного товару $p^{inv} > 0$ прив'язана до якості, тому покращення якості товару призводить до пропорційного зростання ціни.

Визначення обсягу виробництва. Кожна фірма-виробник споживчих товарів підтримує запас власної продукції у всіх регіональних торговельних центрах. На основі інформації про залишки товару в кожному торговельному центрі фірма приймає рішення про обсяги поповнення відповідних запасів, тобто про обсяги власного виробництва. В моделі пропонується використовувати наступне просте правило з теорії управління запасами:

$$D_{i,r,t}^{plan} = \begin{cases} 0 & , SL_{i,r,t} \geq Y_{i,r,t} \\ Y_{i,r,t} - SL_{i,r,t} & , SL_{i,r,t} < Y_{i,r,t} \end{cases}$$

де: $D_{i,r,t}^{plan}$ – необхідний обсяг поповнення запасів торговельного центру регіону r в момент часу t фірмою i ,

$SL_{i,r,t}$ – рівень запасів фірми i в торговельному центрі регіону r в момент часу t ,

$Y_{i,r,t}$ – певне порогове значення.

Тоді сумарне замовлення товару торговельними центрами становить

$$D_{i,t}^{plan} = \sum_{r=1}^R D_{i,r,t}^{plan}$$

Щоб уникнути надмірних коливань обсягів виробництва $Q_{i,t}^{plan}$, які фірма планує виробити в періоді t , часовий ряд сумарних замовлень торговельних центрів $(D_{i,t}^{plan})$ згладжується. Завдяки цьому, фірми-виробники демонструють деяку інерційність під час адаптування фактичних обсягів виробництва до замовлень торговельних центрів

$$Q_{i,t}^{plan} = \xi \cdot D_{i,t}^{plan} + (1 - \xi) \cdot \frac{1}{T} \cdot \sum_{k=t-T}^t Q_{i,k}$$

Зазначимо, що реальний обсяг виробництва $Q_{i,t}$ може відрізнятися від планованого випуску $Q_{i,t}^{plan}$. Обсяги продукції, що постачаються в кожен торговельний центр, визначаються пропорційно до планованих кількостей:

$$D_{i,r,t} = \frac{D_{i,r,t}^{plan}}{\sum_{r=1}^R D_{i,r,t}^{plan}}.$$

Попит на фактори виробництва. Для виробництва споживчих товарів фірмам-виробникам потрібні фізичний капітал та праця. Процес виробництва споживчих товарів моделюється виробничою функцією Кобба-Дугласа з додатковими множниками, що відображують якість фізичного капіталу та професійні навички працівників. Таким чином, випуск фірми-виробника споживчих товарів задається функцією:

$$Q_{i,t} = \min[B_{i,t}, A_{i,t}] \times L_{i,t}^\alpha K_{i,t}^\beta,$$

де: $A_{i,t}$ – середня якість фізичного капіталу (інвестиційного товару),

$B_{i,t}$ – середній рівень професійних навичок працівників фірми,

$L_{i,t}$ – кількість працівників фірми і в момент часу t ,

$K_{i,t}$ – фізичний капітал фірми і в момент часу t ,

α і β – параметри, причому $\alpha + \beta = 1$.

Встановлення ціни. Для визначення ціни на свою продукцію фірми-виробники застосовують стандартний підхід, який в літературі з менеджменту носить назву «аналізу беззбитковості». Він полягає у визначенні такої точки, в якій збільшення обсягу продажів стає достатньо великим, щоб забезпечити прибутковість за зниження ціни, тоді як зниження продажів виявляється достатнім, щоб виправдати зростання цін. По суті, це правило відповідає стандартному способу встановлення цін на основі еластичності.

Припускається, що всі фірми мають сталі уявлення про еластичність попиту $\varepsilon^{e_i} < -1$. Тоді ціна на товар встановлюється як:

$$p_{i,t} = \frac{c_{i,t-1}}{1 + 1/\varepsilon^{e_i}}.$$

Бюджет споживання. На початку періоду t домогосподарство k приймає рішення щодо обсягу бюджету споживання $B_{k,t}^{cons}$, який воно планує витратити. Протягом періоду t агент отримує дохід $Inc_{k,t}$ та має заощадження з попередніх періодів $Ass_{k,t}$. Таким чином, обсяг наявної готівки задається формулою $Liq_{k,t} = Inc_{k,t} + Ass_{k,t}$.

Тоді домогосподарство визначає свій бюджет споживання на основі такого правила:

$$B_{k,t}^{cons} = \begin{cases} Liq_{k,t} - \kappa(Liq_{k,t} - \phi \cdot Inc_{k,t}^{Mean}), & \text{якщо } Liq_{k,t} > \phi \cdot Inc_{k,t}^{Mean} \\ Liq_{k,t}, & \text{інакше} \end{cases},$$

де: $\phi \leq 1$ – частка середнього доходу, нижче якої домогосподарство витрачає всю готівку,

$Inc_{k,t}^{Mean}$ – середній дохід агента k у попередніх періодах.

κ – схильність до заощадження, за визначенням, задовольняє умову $0 < \kappa < 1$.

Отже, через це правило, якщо поточна наявна готівка агента менше частки ϕ від середнього доходу, то вона витрачається повністю. Якщо обсяг наявної готівки перевищує $\phi \cdot Inc_{k,t}^{Mean}$, то агент заощаджує фіксовану частку доходу для утворення резерву на «чорний день».

Вибір споживчого товару. Припускається, що вибір товару споживання домогосподарством є випадковим, причому ймовірність придбання того чи іншого товару визначається виключно ціною, оскільки вважається, що ніяких якісних відмінностей пропонувані товари не мають. Тоді цінність товару для домогосподарства k , який виробляється фірмою i , під час періоду t визначається за простою формулою:

$$v_k(p_{i,t}) = -\ln(p_{i,t}),$$

де $p_{i,t}$ – встановлена фірмою-виробником ціна товару.

Тоді домогосподарство обирає товар i з ймовірністю

$$Prob_{k,i,t} = \frac{\text{Exp}[\lambda_k^{cons} v_k(p_{i,t})]}{\sum_i \text{Exp}[\lambda_k^{cons} v_k(p_{i,t})]}.$$

Таким чином, домогосподарство віддає перевагу дешевшим товарам, а інтенсивність конкуренції на ринку товарів параметризується за допомогою λ_k^{cons} . Обравши товар, домогосподарство витрачає весь свій бюджет споживання на його купівлю. Якщо товару на ринку недостатньо для цього, тобто після покупки в домогосподарства лишаються гроші, заплановані на споживання, воно вибирає наступний товар і намагається витратити залишок бюджету споживання на нього. Так відбувається, доки бюджет не буде витрачено повністю, або на ринку закінчатся товари.

Ринок праці. Попит на ринку праці визначається фірмами-виробниками споживчих товарів. Якщо фірма планує розширити виробництво, вона виставляє на ринку праці вакансію із зазначенням пропонованої зарплати. Потенційні працівники вивчають ранжований перелік виставлених вакансій, обираючи лише ті пропозиції, де пропонована зарплата перевищує мінімальну. В якості мінімальної зарплати використовується поточна зарплата, якщо домогосподарство працевлаштоване, або частка від минулої заробітної плати у випадку безробіття.

Далі, кожна фірма впорядковує заявки про працевлаштування, орієнтуючись на рівні загальних та професійних навичок потенційних працівників. Запрошення на роботу розсилаються визначеній кількості працівників.

Кожен потенційний працівник ранжує отримані пропозиції роботи з урахуванням вартості можливого переїзду до іншого регіону. Кожен працівник приймає пропозицію від тієї фірми, яка запропонувала найвищу зарплату. Всі інші отримують відмову.

Висновки

Агентно-орієнтований підхід є відносно новою парадигмою моделювання, яка виникла на «стику» комп'ютерних наук та економіки. Основними складовими типової АОМ є агенти з визначеними атрибутами та поведінкою, топологія зв'язності агентів, а також середовище, в якому існують агенти. Характерними особливостями АОМ є гетерогенність, обмежена раціональність, здатність до навчання та погляд «знизу догори». Моделі цього класу створюються з різною метою: нормативною, емпіричною, евристичною чи методологічною. АОМ можна класифікувати за природою досліджуваного об'єкту, метою аналізу, припущеннями моделювання або методами аналізу чутливості.

На відміну від традиційних підходів, АОМ є більш природним способом моделювання багатьох складних соціально-економічних систем, проте, як і в будь-якого іншого методу, в них є свої переваги та недоліки. Модель EURACE дає змогу ознайомитися з особливостями застосування АОМ на практиці.

Отже, застосування АОМ дозволяє виявити та формалізувати певні закономірності динаміки економічних систем, а також моделювати їх очікувану поведінку. Таким чином, АОМ є важливим сучасним інструментом підтримки прийняття та оптимізації управлінських рішень на різних рівнях, а також прогнозування наслідків реалізації альтернативних сценаріїв або планів дій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Каталевский Д.Ю. Системная динамика и агентное моделирование: необходимость комбинированного подхода [WWW документ]. URL http://sysdynamics.ru/system/files/5/original/Katalevsky_article_agents_SD.pdf
2. Tesfatsion L. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic, 2005 [WWW document]. URL <http://www2.econ.iastate.edu/tesfatsi/hbintlt.pdf>
3. Караев А.К., Мельничук М.В. Агентно-ориентированные технологии дизайна экономической (фискальной, монетарной) и социальной политики: Монография. – М.: ВГНА Минфина России, 2011. – 274 с.
4. Macal C.M., North J.M. Tutorial on agent-based modeling and simulation // J. of Simulation. – 2010. – N 4. – P.151-162.
5. Tesfatsion L., Judd K.L. Handbook of computational economics, Vol. 2: Agent-Based Computational economics. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 904 p.
6. Windrum P., Fagiolo G., Moneta A. Empirical validation of agent-based models: Alternatives and prospects // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2007. – N 10(2). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/10/2/8.html>
7. Boero R., Squazzonu F. Does empirical embeddedness matter? Methodological issues on agent-based models for analytical social science // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2005. – N 8(4). URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/8/4/6.html>
8. Miller J., Page S. Complex adaptive systems: An introduction to computational models of social life. – 2007. – Princeton University Press. – 264 p.

9. Dawid H., Gemkow S., Harting P., Neugart M. On the effects of skill upgrading in the presence of spatial labor market frictions: An agent-based analysis of spatial policy design // J. of Artificial Societies and Social Simulation. – 2009. – N 12 (4).

URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/5.html>

10. Гуляницкий Л.Ф., Омелянчик Д.А. Разработка и исследование базовой агентно-ориентированной модели функционирования экономики // Компьютерная математика. – 2014. – № 1. – С. 26-36.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2014