

О.Є. Кузьмін, В.В. Козик, Ю.І. Сидоров, В.Е. Єрашок

Національний університет «Львівська політехніка», Львів

СИМУЛЯЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ



Розглянуто історію виникнення, сучасний стан і майбутнє методу абдукційного комп'ютерного агентного симуляційного моделювання. Даний метод застосовують для пояснення еволюційних процесів, що відбуваються в економіці, а також для прогнозування розвитку економічних структур. Незважаючи на низку недоліків (зокрема, недостатньо реалістичну поведінку агентів), які можна подолати шляхом удосконалення як змістовних частин моделей, так і комп'ютерних програм, метод уже використовується в комерційних і експертних цілях на замовлення окремих фірм, галузей промисловості і урядів різних країн.

Ключові слова: симуляційне моделювання, симуляційні дослідження, прогнозування.

Головним методом досліджень еволюційних економічних процесів є метод комп'ютерного симуляційного моделювання, який поряд з емпіричним і теоретичним методами розглядається як третій спосіб, незважаючи на те, що моделі не можуть дати універсального знання. Більш важливим вважається те, що метод відкриває можливості для експериментування в економіці, відтак може слугувати прагматичним цілям [1].

Еволюційні економісти (на противагу неокласичній методології) спочатку повністю відмовилися від застосування математики (австрійська і новоавстрійська школи) і лише потім зрозуміли хибність своєї позиції. Вони взяли на озброєння досягнення математичної генетики, серію моделей Лоткі–Вольфєрра та спрощені базові формалізовані моделі. Це відразу привернуло увагу дослідників і водночас відштовхнуло значну частину консервативно налаштованих економістів-еволюціоністів, оскільки виявилось, що математичний опис еволюційних процесів є більш складний, ніж опис

неокласичних моделей, і потребує певної компетентності. Компроміс був досягнутий після застосування в дослідженнях комп'ютерної техніки та ігрових програм типу *клітинних автоматів*, які діють за відомим принципом KISS (keep it simple, stupid — *будь простіше, дурник*). Гра «Life» наочно продемонструвала, як може відбуватися самоорганізація складних систем при використанні простих логічних правил. У комп'ютерному віртуальному процесі самі собою тимчасово виникали складні математичні конструкції, які щезали після вимикання комп'ютера, щоб виникнути знову під час нової прогонки програми. На цих іграх вчилися осягати логіку самоорганізації, хоча ігрові результати не мали нічого спільного з реальним життям, з реальною економікою.

Багато фахівців, які працюють із симуляційними моделями, наголошують, що метою моделювання з урахуванням чинника історії окремих галузей економіки є не пояснення кількісних даних конкретного історичного епізоду і не конкретизація параметрів моделі, а, скоріше, дослідження того, чи можуть механізми і сили, закладені в модель, генерувати (і в цьому сенсі пояснювати) різні поведінкові схе-

ми, бажано з урахуванням неповної раціональності економічних агентів. Прибічниця еволюційної економіки *Н.А. Макашева* виразила скепсис до комп'ютерних симуляційних моделей так [2]: «Доки не буде вирішена загальнофілософська проблема рефлексії, поведінка агентів, що моделюється, залишиться проявом біологізму, а редукція мікро- і макрорівня в економіці до єдиного теоретичного поля не буде здійснена». Проте, незважаючи на подібний скепсис, уже на сьогоднішній день в економічно розвинених країнах розпочинається чисто прикладне комерційне застосування методу для прогнозування розвитку конкретних галузей в конкретних країнах і навіть на замовлення конкретних фірм.

Ми вважаємо своїм обов'язком надати науковій спільноті України повнішу інформацію щодо історії виникнення методу симуляційного моделювання і сучасного стану цього інструменту досліджень в економіці.

У 1982 р. вийшла з друку монографія видатних американських учених *Р. Нельсона* і *С. Уінтера*, в якій синтезовані уявлення біологічної і економічної еволюцій, що існували на той час [3]. Саме з цієї роботи напрям під назвою «*еволюційна економіка*» почав швидко розвиватися. Нельсон і Уінтер вперше вказали на існування в економічній еволюції діалектично протилежних процесів «*змінності*» («*variation*») і «*відбору*» («*selection*»), аналогічних біологічним мутаціям і дарвінівському природному відбору. Заслугою Нельсона і Уінтера було також створення перших принципових симуляційних комп'ютерних моделей, які можуть прогнозувати майбутні стани системи в імовірнісному контексті. Користуючись моделлю, не можна з упевненістю сказати, який конкретний стан системи буде досягнуто, але аналіз моделі дає можливість виділити можливі класи станів системи і оцінити імовірність перебування в кожному стані.

Зазначимо, що в зарубіжній літературі симуляційне моделювання ще називають *agent-based modeling* (агентне або мультиагентне мо-

делювання). Агентне моделювання є засобом відображення явища, що моделюється у вигляді окремих специфічних активних підсистем, які називають *агентами*. Кожен з агентів взаємодіє з іншими, які утворюють для нього зовнішнє середовище, і в процесі функціонування може змінити як зовнішнє середовище, так і свою поведінку. На відміну від класичного способу, коли проводиться пошук деякого чітко визначеного (детермінованого) алгоритму, який дає можливість знайти найкраще рішення проблеми рівноважного стану системи, в мультиагентних технологіях вирішення одержують автоматично в результаті взаємодії множини самостійних цілеспрямованих програмних модулів — так званих *агентів*.

Створення абдукційних симуляційних моделей, зазвичай агентного типу, відбувається за простим сценарієм:

- ✦ визначення зовнішнього середовища;
- ✦ заповнення його деякою кількістю агентів;
- ✦ встановлення правил-рутин, за якими вони діють;
- ✦ написання програми, яка відтворює процес їх взаємодії у відповідності зі встановленими правилами-рутинами;
- ✦ завдання вхідних параметрів;
- ✦ здійснення багаторазових прогонок до появи переконливого тренду;
- ✦ порівняння одержаних результатів з реальною картиною;
- ✦ корекція програми.

Головною метою у симуляційних дослідженнях є не досягнення «подібності» моделі і реальної динаміки як такої, а верифікація правил-рутин, за якими створювалася модель. Це дає можливість досліднику виявити прості глибокі закони, за якими еволюціонує економічна структура, а відтак дає можливість прогнозування найбільш імовірного розвитку подій у майбутньому.

Після публікації перших результатів щодо використання симуляційних моделей Нельсона і Уінтера у 80–90-х роках ХХ ст. розпочалося бурхливе зростання кількості досліджень,

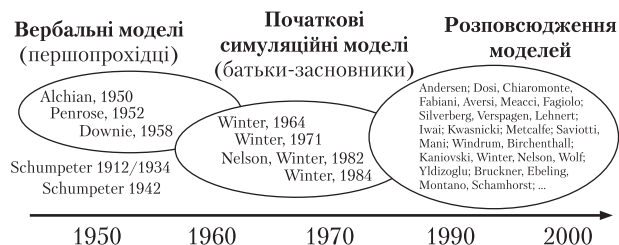


Рис. 1. Три етапи розвитку симуляційних моделей [4]

присвячених цьому напрямку. Один із піонерів симуляційних досліджень В. Квасницький (Вроцлавський університет) наводить низку імен, які відзначилися в цьому напрямку економічної науки [4] (див. рис. 1).

На третьому етапі була розроблена ціла низка так званих *стилізованих симуляційних моделей* (моделей з використанням невеликої кількості правил-рутин узагальненого типу) [5–21].

Ці моделі імітували діяльність одно- і багатопродуктових фірм з простим розширенням виробництва (реплікаційний спосіб). Зростання доходів забезпечувався за рахунок

- ✦ впровадження інновацій та імітацій [7, 17, 18];
- ✦ накопичення досвіду і майстерності працівників [5, 6];
- ✦ ефективного розподілу праці і збільшення її продуктивності [8–14, 20, 21];
- ✦ зменшення витрат на виробництво і удосконалення продуктивності капіталу [7];
- ✦ ефективного вивчення конкурентних виробників і споживачів [18];
- ✦ поліпшення індексу конкурентної спроможності товарів [15, 16].

При цьому ціни на продукцію визначалися ринком [7, 18, 19] або фірмою [5–7]; витрати на НДР іноді регламентувалися [7, 19]; правила інвестування рутинізувалися [20, 21]. На базі принципу інноваційної конкуренції Й. Шумпетера (1883–1950) було створено сімейство симуляційних моделей розвитку промислових фірм, які так і називалися: *Schumpeterian Mark I regime* (Mark II, Mark IIa, Mark III тощо) [16, 22, 23].

Створювалися і досліджувалися моделі, які імітували динаміку інших економічних об'єктів:

- ✦ модель стратифікації – модель еволюції утворення груп економічних структур, різних за своєю діяльністю і різних за масштабами [24];
- ✦ модель самоорганізації ринку товарів, що швидко псуються [25];
- ✦ модель динаміки колективної штучної і стадної поведінки [26];
- ✦ модель конкуренції у боротьбі за ресурси [27, 28];
- ✦ моделі дифузії технологій [29];
- ✦ багаточисельні моделі конкуренції технологій на промисловому рівні з одночасною їх дифузиею [30–39];
- ✦ моделі в умовах шумів і стохастичності [40–43].

Сучасний етап розвитку симуляційних моделей ґрунтується на більш глибоких і спеціалізованих формалізаціях. До таких моделей, зокрема, відноситься модель інноваційного процесу, яка заснована на теорії перколяції (дифузії) [44] і яка показує можливість кластеризації інновацій в часі і технологічному просторі [45]. До цього класу моделей відноситься і модель життєвого циклу продукту, яка також ґрунтується на теорії перколяції [46]. Базова модель перколяції інновацій описана в [47].

Базові симуляційні моделі Р. Нельсона і С. Вінтера мають суттєвий недолік, який полягає в тому, що економічне зростання напряму залежить від коштів, вкладених в дослідницькі програми, що не відповідає принципам Шумпетера та фон Хайєка і взагалі принципам еволюційної економіки. Саме тому виникли нешумпетеріанські симуляційні моделі (НШСМ) двох ключових типів як спроби подолати зазначений недолік. Перший тип характеризується тим, що інновації в моделі з'являються випадково і мають характер стохастичного шуму. В моделях другого типу застосовують введення параметра, який зменшує вплив реплікатора (питомої швидкості росту) [18, 29]. В цілому НШСМ характеризуються п'ятьма аспектами: 1) безперервний пошук новизни; 2) динамічна зміна довкілля; 3) взаємодії між агентами нелінійні; 4) еконо-

мічна система містить механізми відбору з різноманітності; 5) взаємодія різноманітності і відбору керує економічною системою, що є далекою від рівноваги. Детальні пояснення НШСМ можна знайти в огляді [48], а також в монографії, написаній рядом видатних діячів в галузі симуляційного моделювання [49].

Задля прикладу наведемо етапи створення і результати досліджень симуляційної моделі шумпетеріанського типу «*history-friendly*», яка описує історію розвитку комп'ютерної промисловості. В розробці моделі брали участь класики еволюційної економіки Р. Нельсон і С. Уінтер [50]¹.

Структура моделі:

1. Агенти керуються шаблонами і правилами (рутинами), не розуміючи повністю структуру оточення. Більше того, вони не здатні детально розробити і план свого майбутнього. Однак агенти можуть навчатися.

2. Незважаючи на початкові умови, фірма діє і змінює їх. Прибуткова фірма розширюється, нерентабельна — видаляється. Внаслідок останньої перспективи модель коректується. Одночасно дії всіх агентів зумовлені загальними виробничими умовами, які визначають стан для наступної ітерації моделі.

3. У моделі присутня сильна нелінійність, яка не дозволяє розв'язати систему аналітичним способом. За «замовленою» динамікою з'являються результати, далекі від рівноваги.

4. Модель складається з окремих модулів:

Сценарний модуль. Для моделі був детально розроблений сценарій входу нової фірми в процес, яка на початку володіє тільки «тран-

зисторною технологією», її розвиток з неминучими витратами на дослідження і поліпшення «мейнфреймів» до досягнення межі удосконалень. Після цього «розпочиналася» ера мікропроцесорів і РС. Деякі фірми виходять з еволюційного процесу, деякі, які стали лідерами в транзисторній технології, не спішають засвоювати нові процеси, в усякому випадку вони не відмовляються від старих технологій, а для засвоєння нових створюють спеціальні підрозділи;

Комп'ютерний модуль. Якість комп'ютера визначається двома показниками: дешевизною $X_1 = 1/p$, де p — ціна комп'ютера, і X_2 — деяка технічна характеристика. Ці характеристики поліпшуються в результаті витрат на науково-дослідні роботи. Кожен комп'ютер має «кінець життя», який характеризується періодом T . Комп'ютер може бути спроектований із застосуванням обох технологій: із застосуванням транзисторів (TR) або мікропроцесорів (MP). Технології застосовуються в різні періоди і залежать від зовнішніх факторів: на початку використовуються тільки транзистори, оскільки в період t' мікропроцесорів нема. Обидві технології мають свої максимуми параметрів;

Модуль «Споживачі і ринки». Споживачі поділяються на дві групи: перша цікавиться комп'ютерами від «великих фірм» зі значними технічними характеристиками і бажає купити «мейнфрейм». Другу групу цікавлять дешеві комп'ютери типу РС.

Преференцію споживача розраховували за формулою

$$M = b_0 (X_1 - X_{1\min})^{b1} (X_2 - X_{2\min})^{b2}, \quad (1)$$

де M — «рівень користі», який асоціюється з комп'ютером зі специфічними властивостями; $X_{1\min}$, $X_{2\min}$ — порогові вимоги; показники ступеню $b1$ і $b2$ діють немов коефіцієнти еластичності попиту, які виконують таку саму функцію, як і ціна; b_0 — коефіцієнт пропорційності.

Кожна група купує комп'ютери, що є на ринку, з характеристиками, які близькі до M . Отже, M можна інтерпретувати як функцію попиту.

¹ *Необхідні пояснення.* Існують комп'ютери типів «мейнфрейм» (mainframe) і персональні комп'ютери (PC). Мейнфрейми використовувались в 70-х роках ХХ ст. і були виготовлені із застосуванням напівпровідникових транзисторів. У сучасних персональних комп'ютерах застосовуються мікропроцесори, які виготовляють з використанням мікрочіпів. Мікрочіп (інтегральну схему) виконують на одному кристалі (обо декількох, взаємопов'язаних), він містить електронну схему з певною функцією для оброблення інформації. Мікропроцесор є центральним блоком РС для керування машиною.

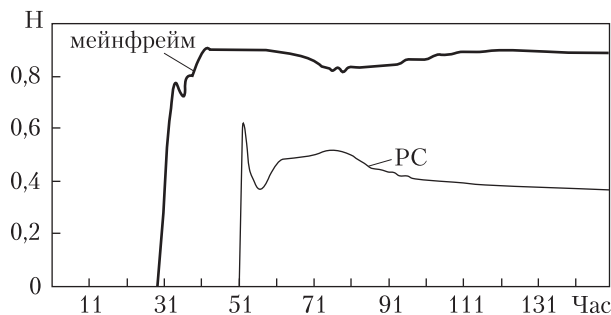


Рис. 2. Реальні траєкторії індексу Герфіндаля (Н) для транзисторної і мікропроцесорної технологій компанії IBM [50]

Враховано, що можуть утворюватися вторинні ринки. Попит може зрости внаслідок появи нових моделей. Урахування цих факторів описується вірогідністю P_i :

$$P_i = c_0 (M_i)^{c_1} (m_i + d_1)^{c_2} (A_i + d_2)^{c_3}, \quad (2)$$

де c_0 – коефіцієнт, який приводить суму вірогідності до одиниці; M_i – «вартість», цінність i -го комп'ютера; m_i – частка ринку фірми, що виробляє i -ий комп'ютер; d_1 – постійна, яка враховує, що комп'ютер, котрий ще не має своєї частки на ринку і не мав попередніх продажів, може мати деякий успіх у продажах; A – рекламна витрата фірми; d_2 – постійна величина, яка виконує роль, що і d_1 , але для фірми, котра ще не має своєї частки ринку і ще не витратилась на рекламу; c_1, c_2, c_3 – спеціальні константи, які враховують різні конкурентні обставини;

Модуль «Технологічна і ринкова компетентність, фінансування і калькуляційна оцінка рішення». В цьому модулі визначені правила інвестування в дослідницькі роботи, причому ці роботи розділяються на роботи, пов'язані зі здешевленням продукції і досягненням більш високих технічних характеристик. Так само встановлюються правила розрахунку доходів;

Модуль «Динаміка перехідного періоду». Цей модуль розроблений з урахуванням висновків теорії фірми. Зокрема, якщо керівництво намагається за допомогою жорстких вказівок

впровадити дещо нове, що кардинально відрізняється від попереднього досвіду, воно стикається з великими труднощами, особливо на фірмах-ветеранах. Відповідно з рекомендаціями теорії в моделі встановлені відповідні рутинні правила;

Модуль «Прийняття нової технології». При переході на нову технологію потрібен деякий час, і цей момент в моделі врахований. Імовірність, що стара фірма буде засвоювати нову технологію, залежить від двох змінних: прогресу, який буде досягнуто від впровадження інновації, і відстані від існуючого технологічного рівня до технологічної межі транзисторної технології. Досягнутий рівень цієї імовірності є сигналом, «що існує нова технологія і нам загрожують неприємності, якщо ми не приймемо її, а будемо рухатися по старій дорозі». Водночас фірма не має досвіду у виробництві нових комп'ютерів, тому повинні бути зроблені інвестиції в дослідницькі програми для набуття цього досвіду і в свої дослідження мікропроцесорного ринку. Успішна фірма-ветеран має для цього достатньо великі накопичені кошти. Коли «стара» фірма наважується на зміни, то вона буде потерпати від певних незручностей, але при цьому здобуває і переваги. Зазначене в модулі оформлено у вигляді математичних залежностей;

Модуль «Диверсифікація». Поширення нової технології можливе, якщо ринок PC більше ринку «мейнфреймів». Якщо це так, то доцільно припинити роботи по удосконаленню старих комп'ютерів. Для поширення технології утворюють «дочірню фірму» (процедура диверсифікації була скопійована з реальної стратегії IBM). Модель спочатку була випробувана на історії компанії IBM. На думку авторів, після корекції модель можна застосовувати для інших фірм зі схожою історією (саме тому модель і називається «*history-friendly*» – модель «дружньої історії»).

На рис. 2 показано траєкторії індексів Герфіндаля (розраховується за допомогою суми квадратів ринкових часток конкурентів) для

обох технологій. Як видно з рисунка, домінуючою технологією в компанії є транзисторна, хоча досить велику частку займає і мікропроцесорна. Причина цього частково полягає в тому, що фірма своєчасно перейшла до використання мікропроцесорних технологій. Потім ІВМ виходить на ринок РС, займаючи значну, хоча й не домінуючу його частину.

Після корекції показників, висування різних гіпотез було одержано симуляційні траєкторії, які близькі до історичних (рис. 3, 4). Додатково на рисунках показано траєкторії, які були одержано в результаті державного втручання.

Очевидно (див. рис. 3, 4), що державне втручання допомагає позбавитись від застарілих технологій, водночас не допомагає засвоєнню нових.

Автори моделі дійшли висновку, що модель є достатньо простою і може використовуватися для опису і прогнозування процесів зі схожою історією. Водночас автори зазначають, що ця модель є тільки спробою конкретного застосування і може бути вдосконалена, хоча навіть така модель дала можливість виявити недоліки промислової політики ІВМ і виробити рекомендації для їх усунення.

Симуляційні дослідження набувають все більшої популярності і для задоволення потреб конкретних споживачів. Для цього створюють спеціальні комп'ютерні центри. До таких центрів відноситься, зокрема, «Лабораторія розвитку симуляційного моделювання» (Laboratory for Simulation Development (LSD); Marco Valente; Department of Economics, University of L'Aquila, Italy). У лабораторії на базі сімейства симуляційних моделей типу AL Mark Ia та ін. [51] формують на замовлення структуру моделі, визначають варіанти і параметри, програмують модель в компільованому кодї С++ з динамічно розташованою пам'яттю і проводять прогонки. Комп'ютерна модель передається споживачеві, якому не потрібні попередні знання з програмування (достатньо пройти курс LSD), для керівництва у практичній діяльності. У подальшому споживачі можуть самостійно вносити зміни в еталонну модель.

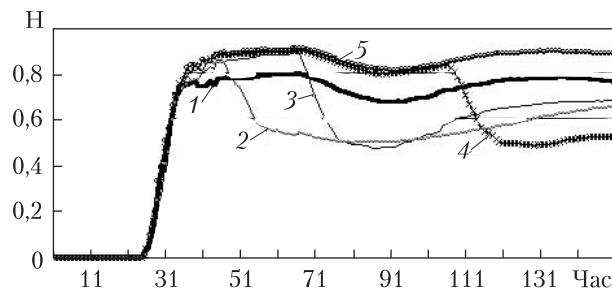


Рис. 3. Симуляційні траєкторії індексу Герфіндала (H) для транзисторної технології компанії ІВМ за різних значень часу державного втручання: 1 – через рік; 2 – через 5 років; 3 – через 10 років; 4 – через 20 років; 5 – без державного втручання [50]

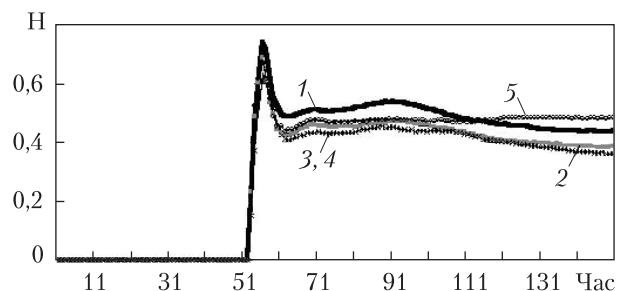


Рис. 4. Симуляційні траєкторії індексу Герфіндала (H) для мікропроцесорної технології компанії ІВМ за різних значень часу державного втручання: 1 – через рік; 2 – через 5 років; 3 – через 10 років; 4 – через 20 років; 5 – без державного втручання [50]

Моделі доступні у Windows, Unix та ОС Mac. Графічний матеріал подається у форматі EPS.

Зазначимо, що перевагою симуляційних моделей типу Mark (як і комп'ютерних моделей взагалі) є можливість одночасно досліджувати еволюційний розвиток декількох фірм. Якщо з цією метою використовувати конкурентну модель Лоткі–Вольтерра [52], то для одночасного спостереження поведінки 5-и фірм потрібно вирішення системи, що складається з 10-и пар диференціальних рівнянь. Крім цих складностей модель Лоткі–Вольтерра, на відміну від моделей AL Mark (крім найпростішої AL MARK Ia), передбачає конкуренцію лише однопроводових фірм, які випускають гомогенні продукти, при цьому виробничі функції

не змінюються. Отже, модель Лоткі—Вольтерра може бути корисною для прогнозування лише за умови регулярності аналізу траєкторій через певні проміжки часу.

До сучасних чисто комерційних консультаційних фірм, які працюють на конкретного клієнта, відноситься, наприклад, американська фірма Simulation Modeling Services, LLC, яка спеціалізується на обслуговуванні підприємств, пов'язаних з охороною здоров'я. За допомогою стимуляційної програми клієнти виразно уявляють для себе результати оперативних змін перед здійсненням реальних дій, візуально бачать потенційно вузькі місця і можливі конфлікти [53]. Подібною діяльністю займається і консультаційна фірма Simulation USA, яка надає послуги виробничим компаніям, бізнесовим структурам як у сфері виробництва, так і у сферах торгівлі і фінансах [54]. Консультаційна фірма EconSys (США) за допомогою симуляційного методу дає змогу замовникам знаходити оптимальний розмір штату [55].

У США існують і більш значні компанії, які займаються комерційними симуляційними дослідженнями. До таких компаній відноситься Information Research Corporation (IRC), що знаходиться в Західній Вірджинії. Клієнтами корпорації є структури державного значення всіх країн, такі, як ФБР, міністерство оборони, НАСА тощо. Доходи корпорації є значними. Так, за 5 років компанія з корпорацією Локхід Мартін уклала контракти на суму 47 млн. дол. США; від контрактів з міністерством оборони США за три роки, починаючи від 2008 р., фірма одержить 497 млн. дол. США. Зрозуміло, що IRC виконує не тільки симуляційні дослідження, тобто послуги для підтримки управління. У коло її завдань входить також організація на замовлення клієнтів інфраструктурних комп'ютерно-аналітичних центрів, тобто їх проектування, будівництво, розвиток, інтегрування центрів, навчання клієнтів, аналіз технологій, різноманітні перевірки і оцінки тощо. Клієнти вимагають, щоб інструменти

моделювання і результати моделювання точно демонстрували всі аспекти їх ділових процесів, можливості управління каналами постачання та перспективами розвитку оперативних систем [56].

У доробку методу симуляційного моделювання є створення прикладних моделей і вирішення за їх допомогою з чисто практичною метою процесів розвитку багатьох галузей промисловості. Зокрема даний метод був використаний для

- ✦ аналізу інноваційної поведінки у фармацевтичній промисловості [57];
- ✦ вивчення фармацевтичної промисловості в динаміці ринку [58];
- ✦ аналізу ринку реактивних двигунів [57];
- ✦ вивчення еволюції в хімічній і фармацевтичній промисловостях [57];
- ✦ вивчення еволюції і поточної конкуренції на ринку електричних двигунів [57];
- ✦ аналізу ринку електроенергії [59];
- ✦ аналізу ринку мобільного зв'язку [60];
- ✦ досліджень виникнення мікрогенерацій в Нідерландах [61];
- ✦ спостережень закономірної сегрегації групи фірм, що входять у певну структуру мережної економіки [62];
- ✦ дослідження коеволюції комп'ютерної і напівпровідникової промисловостей [63];
- ✦ дослідження мережної економіки як дифузії знань в європейському регіоні [64].

У 2010 р. за допомогою методу симуляційного моделювання вдалося адекватно описати перехід розвитку економічних мікроструктур в макроструктурні організації, який відповідав емпіричним даним [65]. До цього часу використання неокласичних моделей не давало позитивних результатів — мікро- і макроструктури існували немов би незалежно.

Зауважимо, що результати досліджень симуляційного моделювання, які виконувалися на замовлення конкретних фірм, є конфіденційною інформацією, яка не підлягає розголошенню.

Метод симуляційного моделювання вже вийшов за рамки вузької спеціалізації і виклада-

ється в деяких університетах в рамках економічної теорії та інформатики [66–68].

Отже, можна зробити висновок, що метод симуляційного моделювання в розвинених країнах набув легітимності, успішно розвивається і набуває комерційної привабливості. Ніщо не заважає застосовувати його з прагматичними цілями і на теренах нашої країни.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Кюнтцель С.* Эволюционное моделирование и критический реализм // Вопросы экономики. — 2009. — № 1. — С. 101–118.
2. *Макашева Н.А.* Компьютерные симуляции и экономическая наука: методологический и эпистемологический аспекты // 7-й Международный симпозиум по эволюционной экономике, 14–15 сентября 2007, Пушино. — М.: ИЭ РАН, 2008. — economics.hse.ru/.../179/418/1241/simp_klyukin.doc.
3. *Richard R. Nelson and Sidney G. Winter.* An Evolutionary Theory of Economic Change. — London: The Belknap Press of Harvard University Press, 1982; Нельсон Р., Уинтер С. Эволюционная теория экономических изменений: Пер. с англ. — М.: Дело, 2002. — 487 с.
4. *Kwasnicki W.* Schumpeterian modelling // Forthcoming in The Elgar Companion to Neo-Schumpeterian Economics, edited by Horst Hanusch and Andreas Pyka (The first version — March 28th, 2003). — <http://prawo.uni.wroc.pl/~kwasnicki/todownload/Schumpeterian20modelling.pdf>.
5. *Silverberg G.* Technical Progress, Capital Accumulation and Effective Demand: A Selforganisation Model, Universitat Stuttgart // Published in D. Batten (ed. (1987) Economic Evolution and Structural Change. — Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1985.
6. *Silverberg G., Dosi G., Orsenigo L.* Innovation, Diversity and Diffusion: A Self-Organisation Model // Economic Journal. — 1988. — V. 98. — P. 1032–1054.
7. *Kwasnicka H., Kwasnicki W.* Market, Innovation, Competition. An evolutionary model of industrial dynamics // Journal of Economic Behavior and Organization. — 1992. — V. 19. — P. 343–368.
8. *Silverberg G., Lehnert D.* Long Waves and 'Evolutionary Chaos' in a Simple Schumpeterian Model of Embodied Technical Change // Structural Change and Economic Dynamics. 1993. — V. 4. P. 9–37.
9. *Silverberg G., Lehnert D.* Evolutionary Chaos: Growth Fluctuations in a Schumpeterian Model of Creative Destruction // MERIT Report 93-003, 1993.
10. *Silverberg G., Verspagen B.* Learning, Innovation and Economic Growth: A Long-run Model of Industrial Dynamics // Industrial and Corporate Change/ — 1994. — V. 3, No 1. — P. 199–223.
11. *Silverberg G., Verspagen B.* Economic Dynamics and Behavioral Adaptation: An Application to an Evolutionary Endogenous Growth Model // IIASA Working paper WP-94-84, 1994.
12. *Silverberg G., Verspagen B.* Collective learning, innovation and growth in a boundedly rational, evolutionary world // Journal of Evolutionary Economics. — 1994. — V. 4. — P. 207–226.
13. *Silverberg G., Verspagen B.* From the Artificial to the Endogenous: Modelling Evolutionary Adaptation and Economic Growth // IIASA Working paper WP-95-08, 1995.
14. *Silverberg G., Verspagen B.* An Evolutionary Model of Long Term Cyclical variations of Catching Up and Falling Behind // IIASA Working paper WP-95-09, 1995.
15. *Dosi G., Fabiani S., Freeman Ch., Aversi R.* On the Process of Economic Development // Center for Research in Management, University of California at Berkeley, CCC Working Paper No. 93-2, 1993.
16. *Dosi G., Marsili O., Orsenigo L., Salvatore R.* Learning, Market Selection and the Evolution of Industrial Structures // Small Business Economics. 1995. — V. 7. — P. 411–436; first published in 1993 as working paper: Center for Research in Management, University of California at Berkeley, CCC Working Paper No. 93-9.
17. *Dosi G., Fabiani S., Aversi R., Meacci M.* The Dynamics of International Differentiation: A Multi-country Evolutionary Model // Industrial and Corporate Change. 1994. — V. 2, No 3. — P. 225–241.
18. *Windrum P., Birchenhall C.* Is product life cycle theory a special case? Dominant design and the emergence of market niches through coevolutionary-learning // Structural Change and Economic Dynamics. — 1998. — V. 9. — P. 109–134.
19. *Yildizoglu M.* Modelling Adaptive Learning: R&D Strategies in the Model of Nelson & Winter (1982) // Institut fédéral de recherches sur les dynamiques. Université Montesquieu (France, Bordeau). Document de travail № 2001-1 (Juin 2001). — 15 p.
20. *Winter S.G., Kaniovski Y.M., Dosi G.* A Baseline Model of Industry Evolution // IIASA Working Report IR-97-013, 1997.
21. *Winter, S.G., Kaniovski Y.M., Dosi G.* Modeling industrial dynamics with innovative Entrants // Structural Change and Economic Dynamics. — 2000. — V. 11. — P. 255–293.
22. *Malerba F., Orsenigo L.* Schumpeterian Pattern of Innovation // Cambridge Journal of Economic. — 1995. — V. 19, No 1. — P. 47–65.
23. *Breschi S., Malerba F., Orsenigo L.* Technological Regimes and Schumpeterian Patterns of Innovation // The Economic Journal. — 2000. — V. 110, No 463. — P. 388–410.
24. *Durlauf S.N.* Neighborhood Feedback, Endogenous Stratification, and Income Inequality / in Barnett W., Gan-

- dolf G., Hillinger C., (eds). *Dynamic Disequilibrium Modelling*. — Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
25. *Weisbuch G., Kirman A.P., Herreiner D.* Market Organisation // GREQAM. — Marseille: Working Paper 96A20, 1996.
 26. *Orlean A.* Bayesian Interactions and Collective Dynamics of Opinions: Herd Behavior and Mimetic Contagion // *Journal of Economic Behavior and Organization*. — 1995. — V. 28. — P. 257–274.
 27. *Schlag K.H.* Why Imitate, and If So, How? A Bounded Rational Approach to Multi-Armed Bandits — University of Bonn: Discussion Paper, 1996.— <http://ideas.repec.org/p/bon/bonsfb/361.html>
 28. *Weibull J.* Evolutionary Game Theory. — Cambridge, MA: MIT Press, 1995. — <http://www.im.pwr.wroc.pl/b-isdg08/pliki/Weibull1210101852581688583.pdf>
 29. *Metcalf J.S.* The Diffusion of Innovation: An Interpretative Survey / in G. Dosi et al. (eds) *Technical Change and Economic Theor.* — London: Pinter, 1988. — P. 560–589.
 30. *Kwasnicki W., Kwasnicka H.* Market, innovation, competition: an evolutionary model of industrial dynamics // *Journal of Economic Behavior and Organization*. — 1992. — V. 19. — P. 343–368.
 31. *Kwasnicki W.* Knowledge, Innovation and Economy. An Evolutionary Exploration. — Aldershot: Edward Elgar, 1996.
 32. *Kwasnicki W.* 1996b, Technological Development: An Evolutionary Model and Case Study. // *Technological Forecasting and Social Change*. — 1996. — V. 52. — P. 31–57.
 33. *Iwai K.* Schumpeterian Dynamics. I: An Evolutionary Model of Innovation and Imitation // *Journal of Economic Behavior and Organization*. — 1984. — V. 5 — P. 159–190.
 34. *Iwai K.* Schumpeterian Dynamics. II: Technological Progress, Firm Growth and Economic Selection // *Journal of Economic Behavior and Organization*. 1984. — V. 5. — P. 321–351.
 35. *Henkin G.M., Polterovich V.M.* 1991, Schumpeterian Dynamics as a Non-linear Wave Theory // *Journal of Mathematical Economics* — 1991. — V. 20. — P. 551–590.
 36. *Silverberg G.* Embodied Technical Progress in a Dynamic Economic Model: the Self-Organization Paradigm / in Godwin R., Krüger, M., Vercelli A., (eds) *Nonlinear Models of Fluctuating Growth*. — 19: 192-208 Berlin-Heidelberg-New York: Springer Verlag, 1984. — P. 192–208.
 37. *Silverberg G., Lehnert D.* Growth Fluctuations in an Evolutionary Model of Creative Destruction / in Silverberg G., Soete, L., (eds). *The Economics of Growth and Technical Change: Technologies, Nations, Agents*. — Aldershot: Edward Elgar, 1994.
 38. *Englmann F.C.* Innovation, Diffusion, Employment and Wage Policy // *Journal of Evolutionary Economics*. — 1992. — V. 2. — P. 179–193.
 39. *Englmann, F.C.* A Schumpeterian Model of Endogenous Innovation and Growth // *Journal of Evolutionary Economics*. — 1994. — V. 4. — P. 227–242.
 40. *Foster D., Young P.* Stochastic Evolutionary Game Dynamics // *Theoretical Population Biology*. — 1990. — V. 38. — P. 219–232.
 41. *Young H.P.* The Evolution of Conventions // *Econometrica*. — 1993. — V. 61, No 1. — P. 57–85.
 42. *Young H.P.* 1996, The Economics of Convention // *Journal of Economic Perspectives*. — 1996. — V. 10, No 2. — P. 105–122.
 43. *Kandori M., Mailath G.J., Rob R.* Learning, Mutations, and Long Run Equilibrium in Games // *Econometrica*. — 1993. — V. 61, No 1. — P. 29–56.
 44. *Percolation theory*. — http://en.wikipedia.org/wiki/Percolation_theory.
 45. *Silverberg G., Verspagen B.* Self-organization of R&D Search in Complex Technology Spaces (2005) — <http://ideas.repec.org/p/dgr/umamer/2005015.html>.
 46. *Frenken K., Silverberg G., Valente M.* A Percolation Model of the Product Lifecycle // Danish Research Unit for Industrial Dynamics. DRUID Working Paper No. 08-20 (2008). — www.druid.dk.
 47. *Hohnisch M., Pittnauer S., Stauffer D.* A Percolation-Based Model Explaining Delayed Take-Off in New-Product Diffusion // Bonn Graduate School of Economics University of Bonn. Discussion Paper 9/2006 (April 2006). — 18 p. — http://www.bgse.uni-bonn.de/BGSE/bonn-econ-papers-1/archive/2006/bgse9_2006.pdf.
 48. *Windrum P.* Neo-Schumpeterian Simulation Models // Maastricht Economic Research Institute on Innovation and Technology (MERIT) — Infonomics Research Memorandum series 2004-002. — <http://www.merit.unu.edu/publications/rmpdf/2004/rm2004-002.pdf>.
 49. *Elgar* Companion to Neo-Schumpeterian Economics / Horst Hanusch, Andreas Pyka (eds). — Cheltenham, Camberley (UK), Northampton (MA, USA): Edward Elgar Publishing, 2007. — 1232 p.
 50. *Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S.* History-Friendly Models: An Overview of the Case of the Computer Industry // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. — 2001. — Vol. 4, No 3. — <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/3/6.html>.
 51. *Andersen E.S., Valente M.* Model Exploration and Extension in the Laboratory for Simulation Development. Chapter 1: Introduction to Artificial Evolutionary Processes // Danish Research Unit for Industrial Dynamics (DRUID) — <http://www.business.aau.dk/evolution/esapapers/esa02/andval1.pdf>.
 52. *Козик В.В., Сидоров Ю.І., Скворцов І.Б., Тарасовська О.Б.* Застосування моделі Лоткі–Вольфгерра для опису дуопольно-дуопсонієвої конкуренції // Актуальні проблеми економіки. — 2010. — № 2(104). — С. 252–260.

53. *Simulation Modeling Services*. Independent consultants serving manufacturing, healthcare, material handling, and service industries. — <http://www.simulation-modeling.com/>.
54. *Simulation Modeling Services*. — <http://simulationusa.com/index.html>.
55. *Economic Systems Inc.* — http://www.econsys.com/manage_simulation.htm.
56. *Welcome to Information Research Corporation.* — http://www.ircwv.com/index.cfm?page=Simulation_Modeling.
57. Saviotti P. P. *Applied Evolutionary Economics: New Empirical Methods and Simulation Techniques*. — Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2003.
58. *Malerba F., Orsenigo L.* Towards a History Friendly Model of Innovation, Market Structure and Regulation in the Dynamics of the Pharmaceutical Industry: the Age of Random Screening // KITEs Working Papers 124, KITEs, Centre for Knowledge, Internationalization and Technology Studies, Università Bocconi, Milano, Italy, revised Jan 2001.
59. *Bunn D., Oliveira F. S.* Agent-Based Analysis of Technological Diversification and Specialisation in Electricity Markets // *European Journal of Operations Research*. — 2007. — V. 181, No 3. — P. 1265–1278.
60. *Пономарев А.Е., Кюнтцель С.В.* Эволюционный подход к моделированию сетевых рынков: пример рынка мобильной связи. — http://vorona.hse.ru/sites/second_level/uf/UU2007NF/Busygin/...
61. *Faber A., Valente M., Janssen P.* Exploring Domestic Micro-cogeneration in the Netherlands: An Agent-based Demand Model for Technological Diffusion // *Energy Policy*. — 2010. — V. 38(6). — P. 2763–2775.
62. *Fagiolo G., Valente M., Vriend N.J.* Segregation in network // *J. of Economic Behavior & Organization*. — 2007. — V. 64. — P. 316–336.
63. *Malerba F., Nelson R., Orsenigo L., Winter S.* Public policies and changing boundaries of firms in a «history-friendly» model of the co-evolution of the computer and semiconductor industries // *J. of Economic Behavior & Organization*. 2008. — V. 67(2). — P. 355–380.
64. *Cassi L., Corrocher N., Malerba F., Vonortas N.* 2008. Research Networks As Infrastructure For Knowledge Diffusion In European Regions // *Economics of Innovation and New Technology*, Taylor and Francis Journals. — 2008. — V. 17(7–8). — P. 663–676.
65. *Ciarli T., Lorentz A., Savona M., Valente M.* The Effect of Consumption and Production Structure on Growth and Distribution. A Micro to Macro Model // *Metroeconomica*. — 2010. — V. 61, No 1. — P. 180–218.
66. *Robinson S.* [http://www.amazon.co.uk/Simulation-Practice-Model-Developmentand-Use/dp/0470847727/ref=](http://www.amazon.co.uk/Simulation-Practice-Model-Developmentand-Use/dp/0470847727/ref=sr_1_5/026-3213125-0308431?ie=UTF8&s=books&qid=1185875807&sr=1-5)
67. *Safarzyńska Karolina Ewa.* *Evolutionary Modelling of Transitions to Sustainable Development*. — Amsterdam: Vrije Universiteit, 2009. — 204 p. — <http://dare.uvu.vu.nl/bitstream/1871/15603/5/9032.pdf>.
68. *Макаров В.* О применении метода эволюционной экономики // *Вопросы экономики*. — 1997. — № 3. — С. 18–26. — <http://www.auditorium.ru/books/596/makarov.pdf>.

О.Е. Кузьмин, В.В. Козык, Ю.И. Сидоров, В.Э. Ерашок

СИМУЛЯЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Рассмотрена история возникновения, современное состояние и будущее метода абдукционного компьютерного агентного симуляционного моделирования. Данный метод используют для объяснения эволюционных процессов, происходящих в экономике, а также для прогнозирования развития экономических структур. Несмотря на ряд недостатков (в частности, недостаточно реалистичное поведение агентов), которые можно преодолеть путем усовершенствования как содержательной части модели, так и компьютерных программ, метод уже используется в коммерческих и экспертных целях по заказу отдельных фирм, отдельных отраслей промышленности и правительств различных стран.

Ключевые слова: симуляционное моделирование, симуляционное исследование, прогнозирование.

О.Е. Кузьмин, В.В. Козык, Ю.И. Сидоров, В.Э. Ерашок

SIMULATION DESIGN OF ECONOMIC PROCESSES

History of origin, modern state and future of method of abduction agent-based computer simulation modeling is considered. The method is used for explanation of evolutionary processes' proceeding in economy and also for prognostication of the development of economic patterns. In spite of failings (in particular, not enough realistic agent behavior) which can be overcome by the improvement of both model's content parts and software, the method is already used with commercial and expert aims by individual firms, industries and governments of different countries.

Key words: simulation design, simulation research, prognostication.

Надійшла до редакції 23.09.10