

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА

Економічний факультет
Кафедра економічної кібернетики та прикладної економіки

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

на тему

Моделювання конкурентних торгів

Виконав: студент 2 курсу, ЕК-61

Панкрад Микола- Богдан Валерійович

спеціальність: 051 – «Економіка»

освітня програма: Економічна кібернетика

Керівник: старший викладач Зубова Віталіна
Вікторівна

Рецензент:

Анотація

Панкрад М. В. **Моделювання конкурентних торгів** (керівник: старший викладач Зубова В.В.)

Створено поведінкову імітаційну модель англійського аукціону, що поєднує класичну теорію аукціонів із підходами економічної кібернетики. Модель враховує інформаційну асиметрію між учасниками, стохастичність їхнього вибору та ефекти, характерні для реальних торгів. Реалізація на Python забезпечила гнучкість побудови алгоритмів і можливість швидкого тестування гіпотез. До моделі створено UML-діаграми, логічні схеми та псевдокод, що описують внутрішню структуру системи. Розроблена модель може використовуватися для дослідження стратегій ціноутворення, прогнозування результатів торгів і розробки практичних рішень у сфері електронних закупівель.

Ключові слова: конкурентні торги, аукціон, імітаційне моделювання, поведінкова економіка, Python.

Summary

Pankrad M. V. **Modeling of competitive bidding** (Scientific supervisor: senior lecturer Zubova V. V.)

A behavioral simulation model of an English auction was developed, combining classical auction theory with approaches from economic cybernetics. The model accounts for information asymmetry among participants, the stochastic nature of their choices, and effects typical of real auctions. Its implementation in Python provided flexibility in algorithm design and the ability to rapidly test hypotheses. UML diagrams, logical schemes, and pseudocode describing the internal structure of the system were also created. The model can be used to study pricing strategies, forecast auction outcomes, and develop practical solutions in the field of electronic procurement.

Keywords: competitive bidding, auction, simulation modeling, behavioral economics, Python.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ.....	6
1.1 ЕКОНОМІЧНА СУТНІСТЬ І РОЛЬ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ У РИНКОВІЙ ЕКОНОМІЦІ.....	6
1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ТОРГІВ ТА МЕХАНІЗМІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ.....	11
1.3 ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ УЧАСНИКІВ ТОРГІВ.....	14
1.4 РОЛЬ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ У ФОРМУВАННІ РИНКОВИХ МЕХАНІЗМІВ	16
1.5 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ.....	17
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ.....	19
2.1.АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ІМІТАЦІЙНИХ ТА АГЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ.....	19
2.2. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ.....	22
2.3. ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ	26
РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ	29
3.1.КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ	29
3.2.АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРУКТУРА СИМУЛЯЦІЇ	31
3.3.ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ.....	33
3.4.ПОБУДОВА ДІАГРАМИ РОЗГОРТАННЯ	36
РОЗДІЛ 4. ОПИС ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ	39
4.1.ОПИС РОБОТИ З ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ	39
4.2.ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ НА ДОСТОВІРНІСТЬ	45
4.3.ЕКОНОМІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ.....	49
4.4.МОЖЛИВІ НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ	50
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	54

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку ринкової економіки, ефективна модель процесів купівлі та продажу, а також оптимальний розподіл на це матеріальних ресурсів є ключовими факторами конкурентоспроможності підприємств та державних установ. Зростаюча роль цифрових платформ, електронних технологій та великих обсягів даних підсилює важливість механізмів конкурентних торгів як інструменту координації ринку.

Конкурентні торги (або аукціони) є важливою формою ринкової взаємодії, що забезпечує ефективність, прозорість та справедливість у визначенні ринкової ціни послуги чи продукту. Вони широко використовуються у державному енергетичному, фінансовому, телекомунікаційному та будівельному секторах. Розробка раціональних алгоритмів поведінки учасників та оптимальних стратегій проведення аукціонів була предметом численних досліджень у рамках теорії ігор та теорії механізмів.

Основоположні праці Вікрея (Vickrey, 1961), Мілгрона та Вебера (Milgrom & Weber, 1982) заклали основи сучасної теорії конкурентних торгів, показавши, як рівень інформації впливають на поведінку учасників та кінцеві результати торгів. Подальші дослідження, зокрема (Klemperer, 2004), розширили практичне застосування цієї теорії, запропонувавши моделі Фрідмана, Databid, статистичні методи для аналізу і прогнозування результатів торгів.

Завдяки досягненням в обчислювальній техніці стало можливим створювати імітаційні моделі, які аналізують динаміку поведінки учасників торгів та вивчають вплив стратегій, кількості учасників, початкових параметрів та інформаційних умов на результати торгів. Ці моделі поєднують аналітичну точність економічної теорії з гнучкістю комп'ютерного моделювання, що робить їх ефективним інструментом для вивчення ринкових процесів.

Мета роботи – розробка та аналіз імітаційної моделі конкурентних

аукціонів, що дозволяє оцінити вплив різних стратегій поведінки учасників та ринкових параметрів на ефективність аукціону.

Об'єкт дослідження – процес конкурентних торгів як форма ринкової взаємодії між економічними агентами.

Предмет дослідження – моделювання стратегії учасників торгів на основі імітаційного моделювання та оцінка їх економічної ефективності.

Науково-практична задача, що має бути вирішена в роботі – розробити імітаційну модель конкурентного аукціону для вивчення впливу поведінкових стратегій учасників на результати проведення торгів і надати рекомендації для підвищення ефективності їх проведення.

Наукова новизна - полягає у розробці узагальненої імітаційної моделі конкурентних торгів, яка поєднує класичні елементи теорії аукціонів із сучасними методами комп'ютерного моделювання та дозволяє вивчати поведінкові аспекти конкуренції на ринку.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ

1.1 ЕКОНОМІЧНА СУТНІСТЬ І РОЛЬ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ У РИНКОВІЙ ЕКОНОМІЦІ

Конкурентні торги є ключовим елементом ринкової економіки, оскільки вони забезпечують принцип вільного ціноутворення та ефективного розподілу ресурсів. Вони сприяють взаємодії попиту та пропозиції на основі конкуренції: кілька учасників подають свої цінові пропозиції, і переможцем стає той, хто запропонує найвищу ставку.

На відміну від класичних ринкових операцій, де ціна фіксована або визначається за двосторонньою угодою, на конкурентному аукціоні ціна формується динамічно, через взаємодію стратегій учасників (Klemperer, 2004).

У науковій літературі (Vickrey, 1961; Milgrom & Weber, 1982) конкурентні аукціони визначаються як спеціально організований механізм, що гарантує ефективне визначення ринкової ціни та ефективний розподіл ресурсів, тобто розподіл ресурсу учаснику, який суб'єктивно цінує його найвище.

Неокласичний підхід розглядає переговори в процесі аукціону як процес, спрямований досягнення ринкового рівноваги, де кожен учасник прагне мінімізувати свої витрати та максимізувати свій прибуток, а кінцева ціна відбиває граничну корисність (Varian, 2010). У реальних умовах поведінковий підхід учасників, не завжди базується на раціональному підході. Часто на результати сильно впливають схильність до ризику, вплив емоцій, ефект переможця і так далі (Kagel & Levin, 2002). Саме тому моделювання дозволяє оцінити вплив цих відхилень на результати переговорів.

Очікуваний прибуток окремого учасника аукціону (Expected Profit) залежить від типу аукціону, стратегії учасника та розподілу цінностей інших учасників (Kahneman, 2011). У загальному вигляді його можна описати як добуток

ймовірності виграшу на різницю між власною оцінкою предмета аукціону та ціною, яку доведеться заплатити. Очікуваний прибуток (Π) для учасника i з власною оцінкою предмета аукціону v_i та ставкою b_i можна представити так:

$$E[\Pi_i] = \Pr(b_i) \times (v_i - E[p | \text{win}]), \quad (1.1)$$

де $\Pr(b_i)$ – ймовірність виграшу учасником при ставці b_i , v_i - власна (суб'єктивна) оцінка цінності лоту, $E[p | \text{win}]$ - очікувана ціна, яку гравець сплатить у разі перемоги.

Звичайно, формула набуває більш конкретного вигляду в залежності від правил аукціону, але навіть в такому вигляді, дає можливість уявити оптимальну стратегію для учасника. Залежно від способу подання пропозицій і правил визначення переможця розрізняють кілька основних форматів аукціонів, які наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика основних типів аукціонів

Тип аукціону	Механізм визначення переможця	Особливості	Типові сфери застосування
Англійський (висхідний)	Переможець - учасник із найвищою ставкою	Прозорість, можливість «ефекту переможця»	eBay, ProZorro
Голландський (спадний)	Перший учасник, що погодився на ціну	Швидкість, зниження ризику затягування торгів	Товарні біржі, квіткові ринки

Закритий (перша ціна)	Найвища ставка, сплачує свою ціну	Необхідність стратегічної поведінки	Державні тендери
-----------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------

Джерело: адаптовано з *Klemperer, 2004, p. 13–29*

На Рис. 1.1 показано залежність між оцінкою вартості лоту v та поданою ставкою b для різних типів аукціонів.

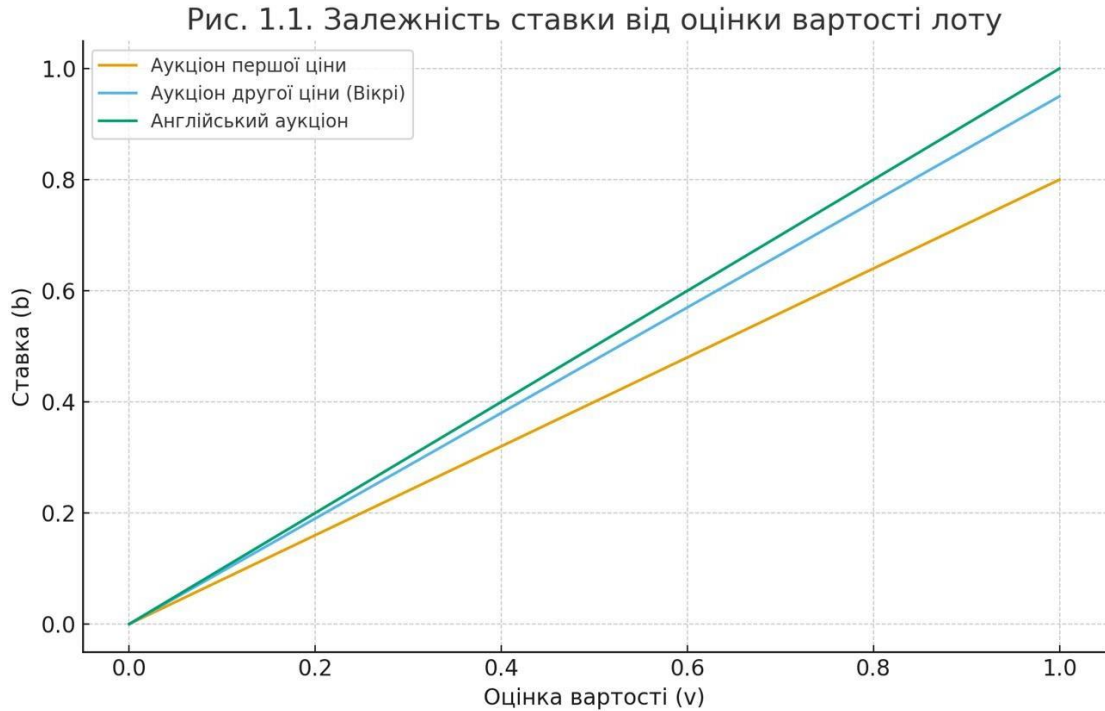


Рис. 1.1. Залежність ставки від оцінки вартості лоту

Джерело: *Krishna, V. Auction Theory (2009). Academic Press, pp. 17–22*

Аукціон другої ціни стимулює подання ставки, близької до реальної оцінки, тоді як у першій ціні учасники занижують пропозицію, щоб збільшити очікуваний прибуток.

У конкурентних аукціонах рівень інформації, доступної учасникам, має вирішальне значення. Наукові роботи продемонстрували, що в контексті пов'язаних цінностей публічні аукціони, такі як англійські аукціони, пропонують продавцям вищу очікувану прибутковість, ніж закриті аукціони (Fudenberg & Levine, 1998). Це пов'язано зі зменшенням ефекту невизначеності: публічні

аукціони дозволяють учасникам точніше оцінити справжню ринкову вартість.

Функція рівноважної ставки для аукціону першої ціни може бути подана як

$$b(v) = v - \int_0^v \frac{F(t)^{n-1}}{F(v)^{n-1}}, \quad (1.2)$$

де, $F(v)$ – функція розподілу оцінок, n – кількість учасників.

Ця залежність показує, що зі зростанням кількості учасників ставка наближається до реальної оцінки вартості лоту. На Рис. 1.2 продемонстровано, як змінюється оптимальна стратегія ставок для різного числа конкурентів.

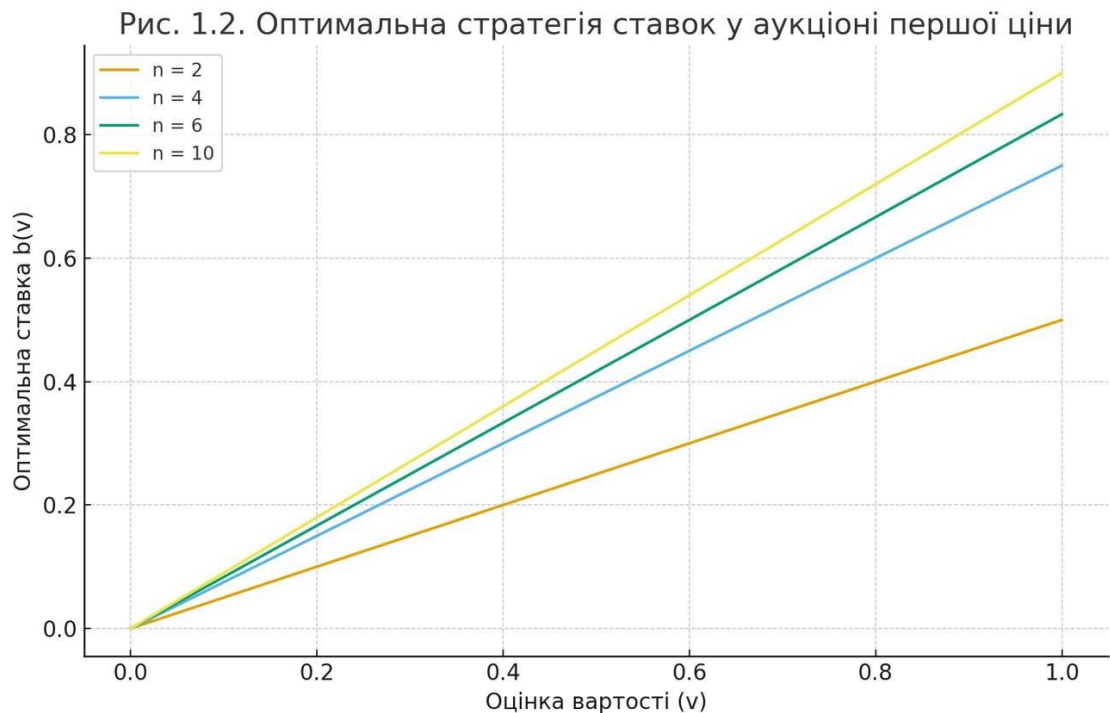


Рис. 1.2. Оптимальна стратегія ставок у аукціоні першої ціни залежно від кількості учасників.

Джерело: *Klemperer, P. Auctions: Theory and Practice (2004). Princeton University Press., pp. 51–59*

Таким чином, інформаційна прозорість і кількість учасників безпосередньо впливають на рівень агресивності стратегій, очікуваний дохід продавця й алокативну ефективність системи.

Конкурентні торги виконують подвійну економічну функцію.

1 Механізм виявлення вартості, що дозволяє формувати ціну на основі реальних ринкових очікувань.

2 Інструмент алокативної ефективності, який забезпечує перерозподіл ресурсів на користь тих учасників, що оцінюють їх найвище.

У ринкових умовах ефективність торгів зростає зі збільшенням кількості учасників до певної межі, після чого стабілізується (Рис. 1.3).

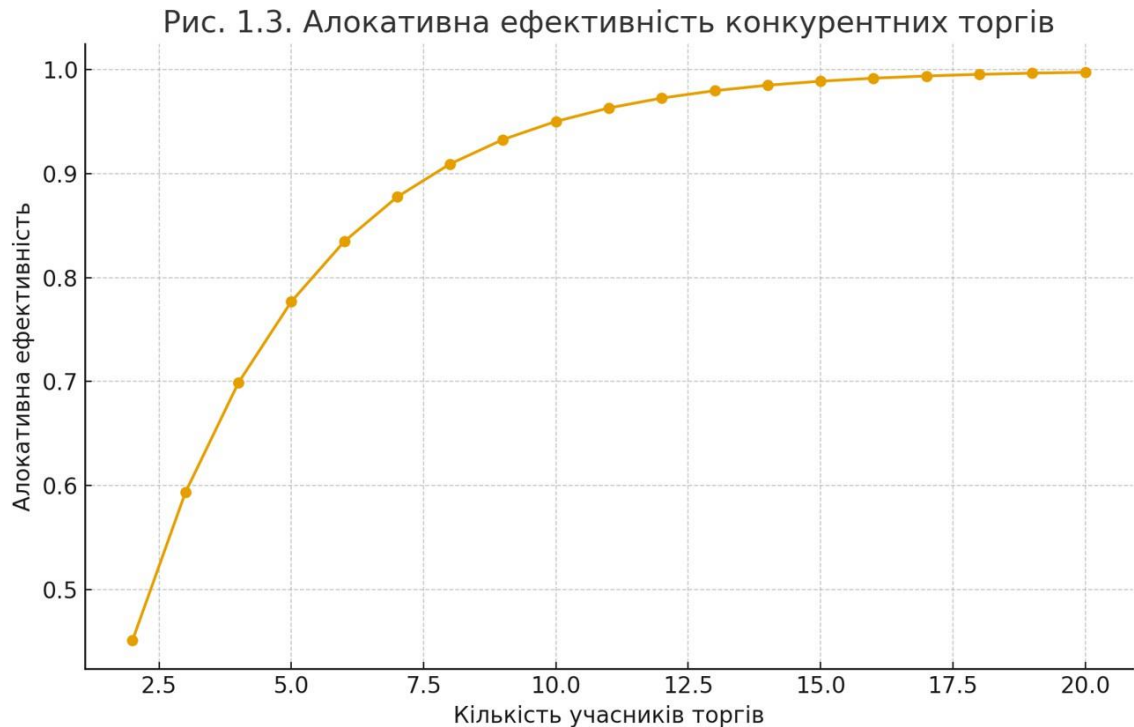


Рис. 1.3. Алокативна ефективність конкурентних торгів залежно від кількості учасників.

Джерело: *Milgrom, P., Weber, R. A Theory of Auctions and Competitive Bidding (1982). Econometrica...*, pp. 1101–1105

Збільшення конкуренції приводить до зменшення інформаційної асиметрії, більшої цінової стабільності та підвищення ефективності ринку (Varian, 2010; Sutton, 1998; Arthur, 2014). Водночас надмірна кількість учасників може збільшити трансакційні витрати та зменшити індивідуальні прибутки, що виправдовує оптимізацію механізмів обміну за допомогою моделювання (Roth, 1988).

Конкурентні аукціони являють собою універсальний ринковий механізм, який поєднує мікроекономічні принципи раціонального вибору з поведінковими

аспектами прийняття рішень. Їх моделювання дозволяє оцінити зв'язок між стратегічною поведінкою учасників, кількістю конкурентів, структурою аукціону та кінцевим рівнем ефективності (Stanford University, 2022). Тенденції, що спостерігаються таким чином, слугують основою для розробки імітаційної моделі, яка буде детальніше розглянута в наступних розділах.

1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ТИПІВ ТОРГІВ ТА МЕХАНІЗМІВ ЦІНОУТВОРЕННЯ

Класифікація конкурентних торгів є вирішальним елементом теоретичного аналізу, оскільки кожен тип аукціону реалізує власний механізм ціноутворення, вибору переможця та розподілу ресурсів. Вибір формату торгів безпосередньо впливає на ефективність конкуренції, прозорість процесу та поведінку учасників. Структура торгів визначає не лише ринкову рівновагу, але й рівень доходу продавця та добробут покупця.

Різні автори пропонують свої критерії класифікації торгів, але узагальнення дозволяє виділити п'ять основних груп параметрів: напрям зміни цін, кількість сторін, що беруть участь, спосіб подання заявок, критерії оцінки та технологічна форма процедури (McAfee & McMillan, 1987). Таблиця 1.2 подає систематизований огляд критеріїв класифікації конкурентних торгів.

Таблиця 1.2

Класифікація типів торгів

Критерій класифікації	Типи торгів	Характеристика
Напрямок зміни ціни	Висхідні (англійські), Спадні (голландські)	Ціна підвищується або знижується до рівноваги
Кількість сторін	Односторонні, Двосторонні	Участь однієї або кількох груп агентів (продавці і покупці)

Подання заявок	Відкриті, Закриті	Ставки або відомі всім учасникам, або подаються конфіденційно
Критерії оцінки	Однокритеріальні, Багатокритеріальні	Визначення переможця лише за ціною або за сукупністю параметрів
Технологічна форма	Традиційні, Електронні	Проведення торгів фізично або на цифрових платформах

Джерело: узагальнено за McAfee & McMillan, 1987, p. 699–701

Односторонні торги - це найпоширеніший вид аукціонів, коли один продавець пропонує товар, а кілька покупців конкурують між собою. Таблиця 1.3 подає їх порівняльну характеристику.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика односторонніх торгів

Тип аукціону	Механізм визначення переможця	Переваги	Недоліки
Англійський	Переможець - учасник із найвищою ставкою	Прозорість, поступове зростання ціни	Можливий "ефект переможця"
Голландський	Перша згода на запропоновану ціну	Швидкість проведення	Менша інформативність
Перша ціна (закритий)	Найвища ставка, сплачує свою	Гнучкість стратегій	Схильність до заниження ставок
Друга ціна (Вікрі)	Найвища ставка, сплачує другу	Стимулює правдивість оцінки	Менш поширений на практиці

Джерело: адаптовано з Krishna, 2010, p. 1–18

Залежно від кількості учасників середня ставка у таких торгах змінюється:

чим більше конкурентів, тим ближчою вона стає до реальної оцінки вартості лоту.

Цю закономірність можна описати наближеною моделлю:

$$b_i(v_i) = v_i \left(1 - \frac{1}{n^{0,6}}\right), \quad (1.3)$$

де b_i – середня ставка учасника, v_i – оцінка вартості, n – кількість учасників

Зі збільшенням кількості учасників середній рівень ставок зростає, проте після певного порогу стабілізується, що свідчить про зменшення маржі між оцінкою й ставкою.

Двосторонні торги (double auctions) відрізняються тим, що в них беруть участь як продавці, так і покупці. Кожен подає власну пропозицію - ціна продавця не повинна перевищувати ціну покупця.

Динаміку зміни цін можна описати адаптаційною моделлю:

$$P_t = P_{t-1} + \alpha (D_t - S_t), \quad (1.4)$$

де P_t – ціна на кроці, D_t – попит, S_t – пропозиція, α – коефіцієнт швидкості адаптації.

На рисунку 1.6 показана динаміка зближення цін попиту й пропозиції у двосторонніх торгах.

Динаміка зближення цін попиту й пропозиції у двосторонніх торгах (на основі моделі α -адаптації)

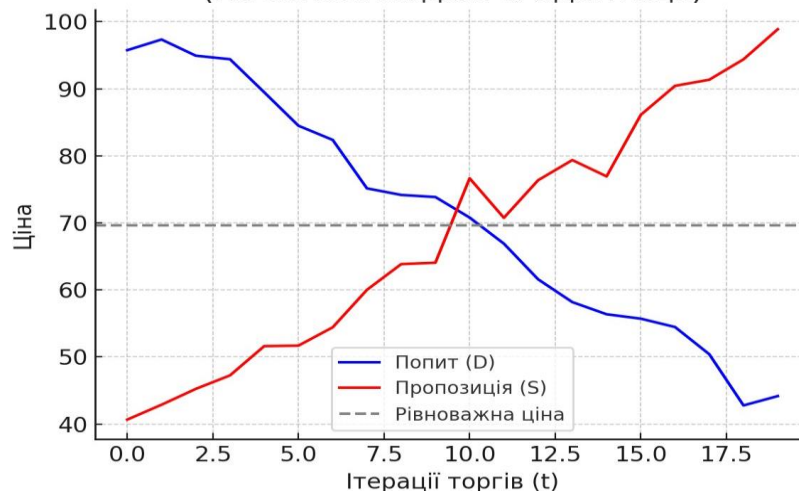


Рис. 1.4. Динаміка зближення цін попиту й пропозиції у двосторонніх торгах.

Джерело: *arian, H. Intermediate Microeconomics (2010). W.W. Norton., pp. 312–319*

Як видно з графіка, із кожною ітерацією торгів крива попиту знижується, а пропозиції – зростає; перетин кривих формує рівноважну ціну, що відображає оптимальний результат конкуренції між сторонами.

Сучасні ринкові торги стають дедалі технологічними та все більше переходять у цифровий формат. Електронні аукціони (ProZorro, Amazon Marketplace, Google Ads) мінімізують транзакційні витрати, гарантують анонімність і прозорість, а також пропонують учасникам кращий доступ до ринку (NBER, 2023; Google Research, 2023; Christie's, 2025; Sotheby's Institute of Art, 2023; ProZorro, 2025; European Commission, 2023; ScienceDirect, 2023; SSRN, 2023). Їхня унікальна особливість полягає в можливості враховувати не лише ціну, а й інші фактори, такі як якість, терміни доставки, надійність постачальника тощо. Аналіз показує, що різні типи конкурентних аукціонів суттєво відрізняються механізмами ціноутворення, кількістю учасників та ступенем прозорості інформації.

Традиційні формати (англійський, голландський та Вікрі) забезпечують базову ефективність та прозорість, тоді як двосторонні та багатоатрибутні моделі краще підходять для поточних ринкових умов (Camerer, 2003).

Електронні аукціони пропонують нові можливості для автоматизації процесів та створення імітаційних моделей, здатних відтворювати поведінку учасників, тестувати різні сценарії та прогнозувати результати транзакцій.

Розроблені підходи до класифікації слугуватимуть основою для подальшого розвитку моделювання програмного забезпечення у практичному розділі.

1.3 ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ УЧАСНИКІВ ТОРГІВ

Поведінка учасників аукціону є ключовим фактором, що визначає їхні результати, рівень конкуренції та економічну ефективність системи.

Учасники приймають свої рішення в контексті обмеженої інформації,

ризикі та невизначеності; тому вивчення їхніх стратегій є важливим аспектом економічного аналізу аукціонів.

У сучасній економічній літературі виділяють три основні теоретичні підходи до аналізу поведінки учасників торгів: раціональний, поведінковий та еволюційний (Simon, 1957). Порівняльний аналіз різних підходів наведений у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Порівняльна характеристика підходів до аналізу поведінки учасників торгів

Підхід	Характеристика	Типові дослідження та застосування
Раціональний (неокласичний)	Ґрунтується на припущенні, що всі учасники діють логічно, прагнучи максимізувати очікуваний прибуток.	Теорія Вікрі (1961), Мілгрота і Вебера (1982), аналітичні моделі рівноваги.
Поведінковий	Враховує психологічні чинники: емоції, страх програшу, ефект переможця, надмірну впевненість.	Kagel & Levin (2002), Camerer (2003); лабораторні експерименти з аукціонів.
Еволюційний (адаптивний)	Учасники змінюють стратегії на основі попереднього досвіду та результатів торгів.	Агентні симуляції, моделі навчання в торгах, машинне навчання.

Джерело: узагальнено за Kagel & Roth, 1995, p. 1–25

Раціональні моделі надають формальний опис ринкової рівноваги, але не враховують поведінкові аспекти. І навпаки, поведінковий підхід пояснює типові відхилення від раціональності: переоцінку, стадну поведінку, реакцію на минулі результати тощо. Еволюційні підходи поєднують ці дві концепції, що дозволяє

вивчати процес стратегічної адаптації в динаміці, що робить їх особливо придатними для моделювання симуляції.

Важливо враховувати ці підходи під час побудови відповідної імітаційної моделі, вона повинна відображати не лише математичну логіку ставок, але й фактичну поведінку, характерну для ринку.

1.4 РОЛЬ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ У ФОРМУВАННІ ЕФЕКТИВНИХ РИНКОВИХ МЕХАНІЗМІВ

Конкурентні торги відіграють життєву важливу роль у функціонуванні ринкової економіки, оскільки вони дозволяють реалізувати принципи справедливості, прозорості та ефективності.

Їх використання допомагає запобігти монополістичній практиці, підвищує прозорість та зменшує інформаційну асиметрію серед учасників.

З макроекономічної точки зору, торги оптимізують розподіл ресурсів та сприяють передачі активів від менш ефективних до більш продуктивних власників (Marshall, 1890). Тому, якщо комусь непотрібний товар, знайдеться купа покупців, охочих отримати з цього вигоду. Таблиця 1.5 пояснює вплив аукціонів на економічні процеси на різних рівнях економіки.

Таблиця 1.5

Вплив конкурентних торгів на економічні процеси

Рівень аналізу	Функції торгів	Результат
Макроекономічний	Забезпечення ефективного розподілу ресурсів між галузями	Зростання ВВП, конкурентоспроможність економіки
Мезоекономічний (галузевий)	Формування ринкових цін і стимулювання конкуренції	Підвищення прозорості, зниження цінових викривлень
Мікроекономічний	Оптимізація витрат підприємств, пошук найкращих партнерів	Зростання прибутковості, розвиток бізнес-інновацій

Джерело: узагальнено за Шумпетером, 2011, с. 87–94

Досвід країн ЄС показує, що ефективні механізми конкурентних торгів зміцнюють довіру ринку, знижують ризик корупції у державних закупівлях та стимулюють участь малих та середніх підприємств.

Для України, де впровадження електронної системи ProZorro стало прикладом успішної інтеграції ринкових засад у державне управління, конкурсні торги є інструментом не лише економічних, а й державних реформ.

Таким чином, конкурсні торги становлять основу ринкової економіки, сприяють справедливому ціноутворенню, підвищують ефективність як державного, так і приватного секторів та закладають основу для майбутнього використання імітаційних моделей для аналізу ринкової поведінки.

1.5 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ

На основі аналізу економічної сутності та класифікації конкурентних торгів можна сформулювати загальну постановку задачі моделювання, яка слугуватиме основою для подальшого розвитку імітаційної моделі.

Метою моделювання є вивчення взаємозв'язку між кількістю учасників, типом торгів та обраною стратегією торгів, а також оцінка впливу цих факторів на кінцеві результати (ціна, прибутковість, стабільність ринку).

Об'єктом моделювання є процес конкурентних торгів, який відбувається між незалежними учасниками з різними початковими оцінками та стратегічними цілями.

Предметом дослідження є взаємодія стратегій учасників у рамках різних типів торгів (англійських, голландських, закритих та двосторонніх).

Основними припущеннями моделі є:

- усі учасники діють раціонально в межах заданих стратегій;
- інформаційні умови є симетричними (усі мають рівний доступ до правил і стартових даних);
- результати торгів визначаються випадковими факторами, що імітують

ринкову невизначеність.

Як метод дослідження обрано імітаційне моделювання із застосуванням мови програмування Python, що дозволяє відтворити поведінку агентів та провести серію експериментів у різних ринкових сценаріях (Python Software Foundation, 2025). До вхідних параметрів моделі належать кількість учасників, тип торгів (англійські, голландські, закриті чи двосторонні), стартова ціна та стратегія торгів кожного агента. Вихідними показниками виступають кінцева ціна реалізації, рівень прибутковості, кількість зроблених ставок і загальна стабільність торгів.

Очікуваним результатом моделювання є отримання узагальнених висновків щодо ефективності різних форматів торгів і стратегій учасників, а також створення інструменту для подальших експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ

2.1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ІМІТАЦІЙНИХ ТА АГЕНТНИХ МОДЕЛЕЙ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ

У сучасній економіці моделювання процесів конкурентних торгів розвивається в напрямку побудови імітаційних та агентно-орієнтованих моделей, які дозволяють більш реалістично відтворювати поведінку учасників ринку. На відміну від класичних аналітичних підходів, що статично описують стани рівноваги ринку, імітаційні моделі дозволяють відстежувати динамічну взаємодію учасників – зміни ставок, реакції на торги та адаптацію стратегій до невизначеності.

Суть імітаційного методу полягає у створенні віртуального середовища, в якому відтворюється процес торгів, а учасники (агенти) діють за заздалегідь визначеними алгоритмами поведінки. Кожен агент має свої характеристики – рівень інформації, початкову оцінку продукту, стратегію торгів та толерантність до ризику.

Це дозволяє отримувати більш реалістичні результати, ближчі до поведінки реальних учасників ринку, де рішення приймаються не лише раціонально, але й з урахуванням психологічних та інформаційних факторів. Імітаційні моделі конкурентних торгів базуються на агентно-орієнтованому моделюванні (АВМ), яке розглядає кожного учасника як окремого агента з автономними правилами прийняття рішень. Ці агенти можуть взаємодіяти один з одним або з центральним механізмом торгів (аукціоністом), що сприяє обміну даними, порівнянню ставок та визначенню переможця.

Головною перевагою цього підходу є можливість моделювання складних систем, у яких результати залежать від колективної поведінки великої кількості учасників. Порівняльна характеристика різних моделей наведена у таблиці 2.1.

Порівняльна характеристика імітаційних моделей

Тип моделі	Коротка характеристика	Приклад використання
Аналітичні імітаційні моделі	Використовують математичні функції попиту, пропозиції та цінового коригування	Моделі Клемперера, Вікрі, Мілгрма
Агентно-орієнтовані моделі (АВМ)	Кожен учасник - автономний агент з власною логікою прийняття рішень	NetLogo, AnyLogic, Mesa (Python)
Моделі з машинним навчанням	Використовують алгоритми прогнозування для вибору оптимальних стратегій	Reinforcement Learning Auctions (2020–2024)
Гібридні системи	Поєднання симуляційного середовища з реальними ринковими даними	Аналіз торгів на eBay, Amazon, ProZorro

Джерело: Law A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. – 5th ed. – McGraw-Hill, 2015. – P. 31–52

Особливе місце серед імітаційних підходів займають гібридні моделі, що поєднують аналітичні формули з реальними даними електронних аукціонів (Tirole, 1988).

Наприклад, у системі ProZorro можна отримати дані про кількість учасників, середню кількість ставок, стартову і кінцеву ціну, що дозволяє калібрувати модель та оцінювати її точність.

Подібні підходи використовуються і в платформах eBay, Google Ads, де аукціонні механізми оптимізуються на основі великих даних (Big Data) і штучного інтелекту. На рисунку 2.1 представлена загальна архітектура агентної моделі торгів

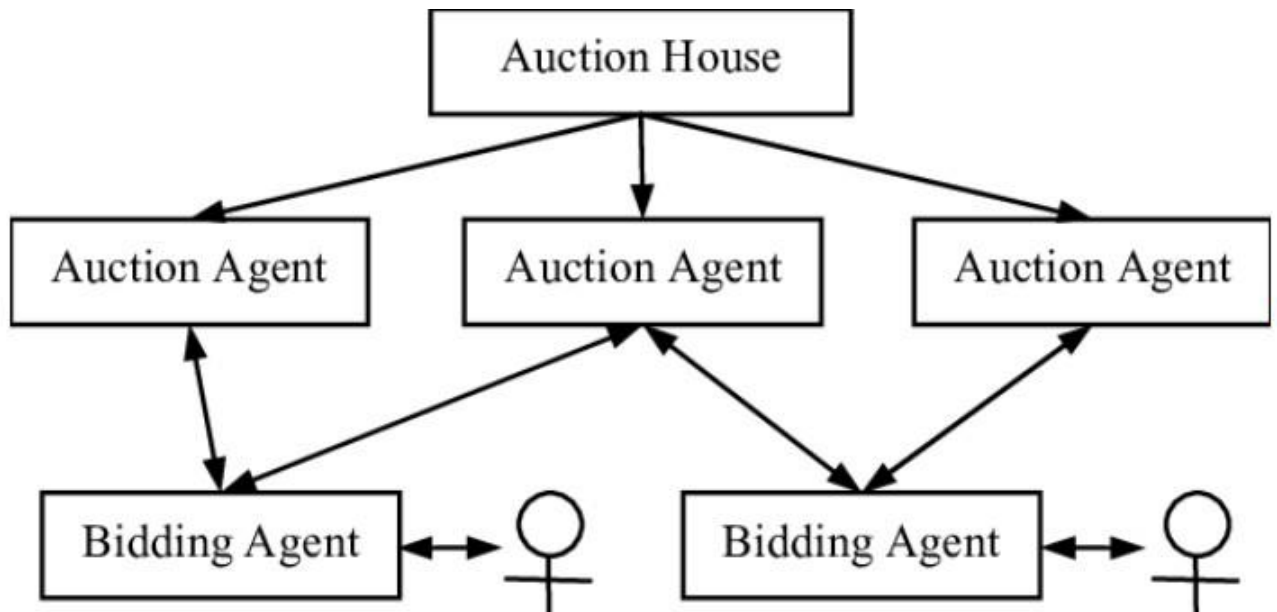


Рис. 2.1. Загальна архітектура агентної моделі торгів.

Джерело: Ford B. J., Xu H., Bates C. K., Shatz S. M. "Automated Complete Online Auction System with Server & Client Side Implementations"

Сучасні дослідження в галузі симульованих аукціонів часто застосовують принцип адаптивного навчання, згідно з яким стратегія учасника змінюється на основі результатів попередніх раундів. Сучасні дослідження продемонстрували, що навіть у простих експериментальних аукціонах агенти поступово сходяться до рівноважної поведінки. Це демонструє, що ринки самоорганізуються за своєю природою, і динаміку торгів можна моделювати без необхідності суворого контролю з боку організатора.

Крім того, сучасні агентні моделі дозволяють вивчати не лише динаміку цін, але й соціальні ефекти, такі як довіра між учасниками, вплив інформаційної асиметрії та формування репутаційного капіталу. Це робить симуляцію корисним інструментом не лише для наукових досліджень, але й для розробки реальних механізмів аукціонів в урядових та корпоративних системах.

Таким чином, симуляція та агентні моделі створюють гнучкий інструментарій для аналізу складних ринкових систем, де класичні теоретичні методи виявляються недостатніми.

2.2. ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ

Сучасна наукова література та ділова практика пропонують велику кількість моделей, що описують процес конкурентних торгів. Вони відрізняються механізмами ціноутворення, методами торгів, технологічними особливостями та рівнем автоматизації. Загалом, усі моделі можна умовно поділити на три групи: теоретичні (аналітичні), експериментально-моделюючі та електронні (цифрові).

Перші – це математичні конструкції, розроблені для опису ідеалізованого ринку, де учасники мають повну інформацію та діють раціонально. Другі – це системи моделювання, що відтворюють взаємодію агентів у середовищі, максимально наближеному до реального. Треті – це практичні електронні платформи, що використовуються урядами або корпораціями для проведення аукціонів та збору даних.

Класичні теоретичні моделі включають моделі Вікрея (1961), Мілгрота та Вебера (1982) та Клемперера (2004), які стали основою сучасної теорії торгів. Ці підходи описують ідеальні умови, коли учасники повністю раціональні, а результат торгів залежить виключно від оціночної вартості ресурсу.

Незважаючи на їх спрощення, вони дозволили пояснити явища, що спостерігаються в реальних електронних системах: закономірність зростання ставок зі збільшенням кількості учасників, ефект переможця, інформаційну асиметрію тощо. Теоретичні моделі є фундаментальними, але вони не враховують складну поведінку реальних агентів та технічні аспекти торгів. Тому згодом їх поєднували з методами моделювання.

Починаючи з досліджень Kagel & Levin (2002) було доведено, що навіть за умов обмеженої раціональності учасники можуть виробляти ефективні стратегії, які наближаються до рівноважних. У цих моделях особливу роль відіграє агентний підхід, де кожен учасник має власну стратегію, а система розвивається

за принципом самоорганізації. Перевагою імітаційних моделей є можливість тестування великої кількості сценаріїв — від невеликих торгів з 3–4 учасниками до масштабних систем з десятками агентів. Такі моделі можуть враховувати інформаційні обмеження, затримки ставок, часові межі, вплив попередніх результатів - тобто всі ті фактори, які визначають поведінку учасників на практиці.

Імітаційні моделі, реалізовані на Python або NetLogo, дозволяють не лише аналізувати економічну ефективність торгів, але й візуалізувати процес - тобто побачити, як змінюється ціна, кількість активних агентів або частота перемог певних стратегій. Такі підходи особливо ефективні в академічних дослідженнях, де потрібно довести закономірності без реального фінансового ризику.

Паралельно з розробкою теоретичних та імітаційних моделей з'явилися реальні електронні системи, які стали практичним втіленням механізмів конкурентних торгів. Серед найвідоміших прикладів – eBay, Amazon Marketplace, Google Ads Auctions та державні системи ProZorro (Україна) та TED (Європейський Союз). Ці системи реалізують різні алгоритми визначення переможця: від торгів в англійському стилі (eBay) до багатоатрибутної оцінки тендерів (ProZorro, TED). Вони поєднують простоту використання для учасників з високим рівнем автоматизації та контролю. Таблиця 2.2 показує порівняння існуючих моделей конкурентних торгів.

Таблиця 2.2

Порівняльна характеристика існуючих моделей конкурентних торгів

Модель або система	Тип торгів	Метод реалізації	Основні особливості	Сфера застосування
Vickrey Model (1961)	Закриті (2-а ціна)	Теоретична	Стимулює чесність ставок	Академічна теорія

Double Auction (Gode & Sunder, 1993)	Двосторонні	Імітаційна	Самоорганізація попиту й пропозиції	Біржі, експерименти
eBay Auction Engine	Англійські	Електронна онлайн-система	Динамічна конкуренція, великі дані	Онлайн-продажі
ProZorro (Україна)	Електронні торги	Публічна веб-платформа	Прозорість, соціальний контроль, державна політика	Публічні закупівлі
TED (ЄС)	Електронні тендери	Централізована євросистема	Гармонізація Стандартів у межах ЄС	Європейські закупівлі

Джерело: власна розробка

На рисунку 2.2 можна побачити типову архітектуру електронної системи конкурентних торгів (на прикладі ProZorro)

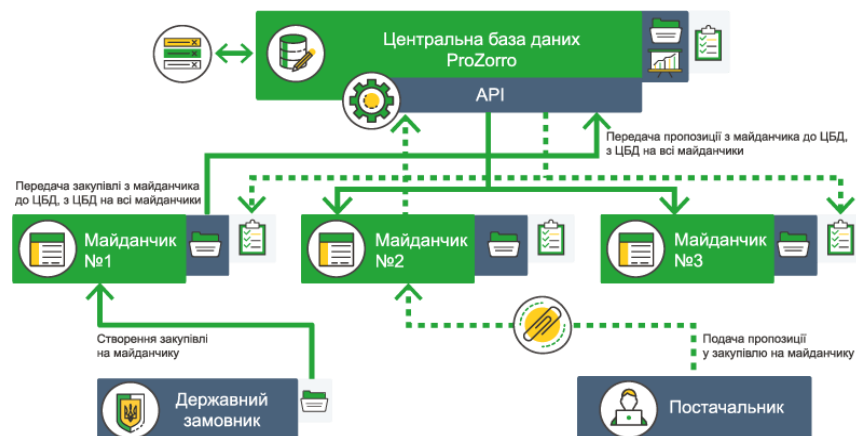


Рис. 2.2. Алгоритм проведення електронного тендеру ProZorro

Джерело: офіційний сайт ProZorro, схема проведення тендерів

На основі літературних джерел і відкритих даних можна виділити кілька ключових критеріїв, за якими оцінюють ефективність моделей конкурентних торгів:

1 Прозорість — рівень відкритості інформації для учасників.

У цьому аспекті електронні системи (ProZorro, TED) мають беззаперечну перевагу.

2 Швидкість і масштабованість — наскільки система здатна обробляти велику кількість торгів.

Тут лідирують комерційні платформи (eBay, Amazon).

3 Гнучкість налаштування — можливість адаптації правил торгів під різні сценарії.

Найбільшу гнучкість мають імітаційні агентні моделі.

4 Реалістичність поведінки — чи враховуються психологічні та соціальні аспекти.

Таблиця 2.2

Порівняння моделей за сновними критеріями ефективності

Модель або система	Прозорість	Реалістичність	Швидкість	Гнучкість
Теоретичні моделі	Низька	Середня	Висока	Обмежена
Імітаційні агентні	Середня	Висока	Середня	Висока
Електронні системи (ProZorro, eBay)	Висока	Висока	Висока	Середня

Джерело: власна розробка

Порівняння показує, що сучасні системи електронних торгів поступово інтегрують розробки теоретичних імітаційних моделей. Зокрема, ProZorro поєднує математичну прозорість алгоритмів з гнучкістю відкритих API, що дозволяє автоматизувати перевірку учасників та моніторинг усіх етапів закупівель. Саме тут можна дізнатися про непомірні трати бюджетних коштів нашими чиновниками, тому дуже не хотілося закриття сайту чи його обмеження для громадськості.

Тим часом, агентні імітаційні моделі залишаються основою для наукових досліджень та тестування нових стратегій. Таким чином, існуючі моделі демонструють поступовий перехід від теоретичних формул до справді цифрових систем. Цей досвід слугуватиме основою для розробки власної імітаційної моделі конкурентних торгів, адаптованої до умов українського ринку.

2.3. ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ КОНКУРЕНТНИХ ТОРГІВ

Розвиток сучасних економічних систем вимагає постійного вдосконалення механізмів конкурентної взаємодії між учасниками ринку. Торги, що проводяться через аукціони, є одним з найефективніших інструментів ціноутворення та розподілу ресурсів. Однак, зі зростанням складності ринкових процесів виникає потреба у створенні моделей, здатних імітувати поведінку учасників, оцінювати ефективність стратегій та прогнозувати результати торгів за різних умов.

Ці обставини забезпечують основу для розробки імітаційної моделі конкурентних торгів, що дозволяє вивчати вплив ринкових факторів на результати процесу та тестувати можливі сценарії поведінки учасників без ризику для реального ринку.

Головною економічною передумовою для розвитку моделі є зростаюча роль цифрових ринків та зміна принципів конкуренції. На відміну від традиційних ринкових транзакцій, де взаємодія між сторонами обмежувалася фізичним

простором, сучасні аукціони відбуваються на електронних платформах, таких як ProZorro, eBay, Amazon Marketplace та Google Ads Auctions. Глобальний ринок торгів у режимі реального часу оцінювався в 14,37 млрд доларів США у 2023 році та, як очікується, досягне 39,61 млрд доларів США до 2030 року, зростаючи зі середньорічним темпом зростання 16,0% з 2024 по 2030 рік (OECD, n.d.). Зростаючий попит на цільову рекламу є одним із значних факторів, що стимулюють зростання ринку. На рисунку 2.3 представлена капіталізація ринку аукціонів.

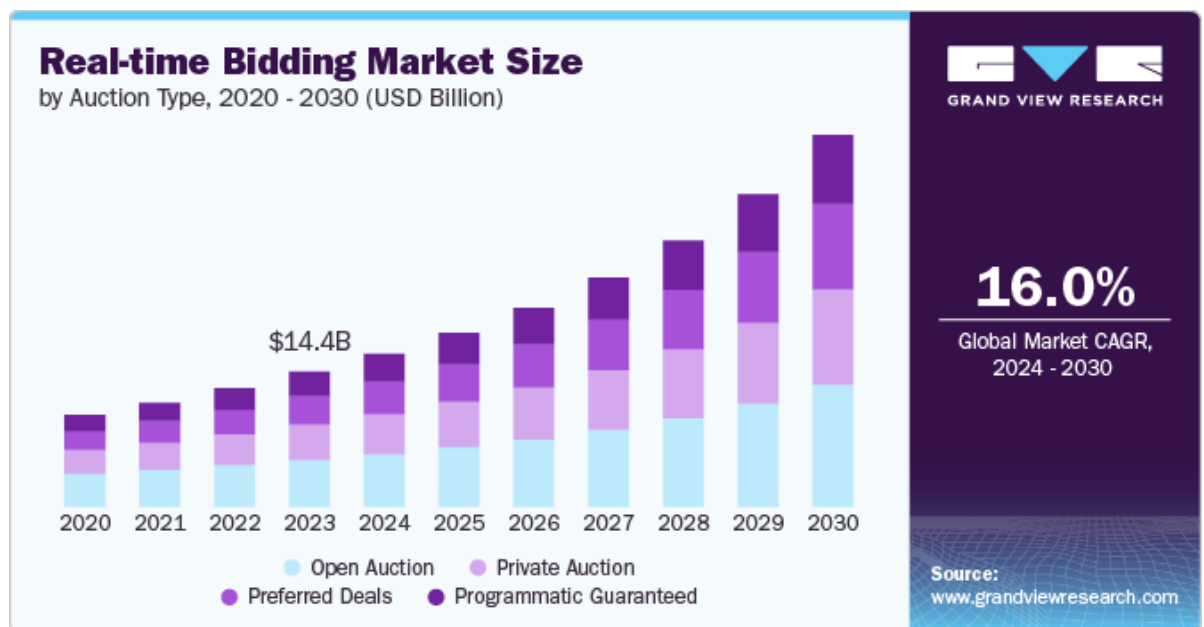


Рис. 2.3. Капіталізація ринку конкурентних торгів за даними Grand View Research
 Джерело: капіталізація ринку конкурентних торгів за даними порталу Grand View Research

Це породжує нові фактори, включаючи алгоритмічні стратегії, інформаційну асиметрію та автоматизовану оцінку ризиків. Другою економічною передумовою є необхідність підвищення ефективності закупівель та тендерних процесів у державному секторі. Згідно зі звітами Міністерства економіки України, впровадження системи ProZorro скоротило неефективні витрати більш ніж на 10%, але залишається кілька проблем, зокрема оптимізація стартових цін, прогнозування поведінки учасників та аналіз коливань ринку. Тільки імітаційні моделі, що відтворюють динаміку реальних тендерних процесів, дозволять

вирішити ці проблеми.

Розвиток програмного забезпечення для моделювання створило технічні умови широкого застосування імітаційного моделювання. Мови програмування Python, R, Julia забезпечують швидку розробку агентно-орієнтованих систем, а такі бібліотеки, як Mesa, SimPy, AnyLogic дозволяють створювати повноцінні ринкові симуляції без необхідності використання дорогого комерційного програмного забезпечення.

З практичної точки зору, впровадження імітаційних моделей стає можливим завдяки зростаючій відкритості державних та корпоративних даних. Ще одним організаційним фактором є попит з боку бізнесу та державних установ на моделі для прогнозування результатів торгів, особливо у сфері будівництва, енергетики та охорони здоров'я. Отже, створення академічної симуляції конкурентних торгів може мати не тільки теоретичне, а й практичне застосування.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок про те, що створення імітаційної моделі конкурентних торгів є логічним висновком як з наукової, так і практичної точки зору. Існуючі системи, хоч і забезпечують прозорість та автоматизацію процесів, не дозволяють детально вивчати поведінкові аспекти учасників та тестувати ефективність альтернативних стратегій.

Таким чином, імітаційний підхід дозволяє заповнити цю прогалину, поєднуючи переваги теоретичних, експериментальних та цифрових методів аналізу ринку.

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

3.1. КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ

Для побудови імітаційної моделі конкурентних торгів у цій роботі було обрано англійський аукціон. Це рішення не випадкове: англійський формат є одним із найстаріших, найпрозоріших та найпопулярніших у світі. Саме за його правилами проводиться більшість публічних аукціонів - від антикварних розпродажів до електронних закупівель та онлайн-аукціонів. Фактично, кожен, хто хоч раз бачив телешоу на кшталт “Storage wars” чи подібні шоу з гаражними та складськими розпродажами, інтуїтивно розуміє принцип роботи цього механізму: аукціоніст швидко оголошує про підвищення ставок, учасники підвищують ціну, і напруга зростає, доки не залишається лише один учасник торгів.

Саме завдяки цій природності та зрозумілості процесу англійський аукціон є ідеальною основою для моделювання поведінки учасників торгів, а також для вивчення інформаційних ефектів, психологічних факторів та динаміки конкуренції. У цьому розділі детально описано, як побудована розроблена модель, які елементи вона включає та як її логіка підходить до реальних ринкових ситуацій. Побудова моделі спирається на підходи економічної кібернетики, у межах яких торги розглядаються як динамічна й адаптивна система, що еволюціонує внаслідок послідовних рішень автономних агентів. Кожен учасник діє в умовах неповної інформації, спирається на власні суб’єктивні очікування та індивідуальне ставлення до ризику, а також реагує на поведінку інших гравців, що формує складну нелінійну взаємодію.

На відміну від традиційних моделей аукціонів, де учасники вважаються цілком раціональними та здатними точно оцінити очікуваний прибуток, запропонована модель підкреслює поведінкові аспекти, властиві реальним електронним транзакціям (Kahneman, 2011). Кожен учасник має свій власний

сигнал щодо вартості активу, який вони поєднують із загальною ринковою інформацією. Вони по-різному оцінюють ризики та потенціал переплати, можуть приймати рішення з певним запасом стохастичної похибки та застосовувати більш-менш агресивну стратегію (Tirole, 1988). Ці фактори часто є джерелом феномену “прокляття переможця” на реальних аукціонах, де переможцем виявляється той, хто найбільше переоцінив товар.

У цій моделі англійський аукціон реалізовано як дискретний процес, що включає три ключові компоненти: аукціоніст, учасників та інформаційне середовище. Аукціоніст координує аукціон: встановлення початкової ціни, визначення механізму збільшення ставки та реєстрація вибуття учасників. Учасники отримують приватні сигнали на початку моделювання та під час аукціону постійно уточнюють свої оцінки на основі підвищення ціни та вибуття конкурентів (Tesfatsion & Judd, 2006; Epstein, 2006). Інформаційне середовище поєднує спільний компонент — вартість активу — з параметрами поточного стану аукціону, доступними всім учасникам.

Взаємодія відбувається циклічно. На початку кожного раунду аукціоніст оголошує нову ціну. Потім учасники переглядають свої очікування щодо вартості активу, використовуючи Bayesian-оновлення, яке враховує як їхню власну оцінку, так і поведінку інших гравців у міру зростання ціни. На основі цієї оновленої оцінки кожен учасник визначає, чи раціонально залишатися на аукціоні. Це рішення не є детермінованим: воно приймається за логіт-моделлю Quantal Response, яка може відтворювати реалістичні поведінкові варіації - нерівномірні реакції на високі ціни, випадкові помилки та вагання. Учасники, для яких продовження аукціону здається занадто ризикованим або не вигідним, вибувають, і процес повторюється на наступному рівні ціни.

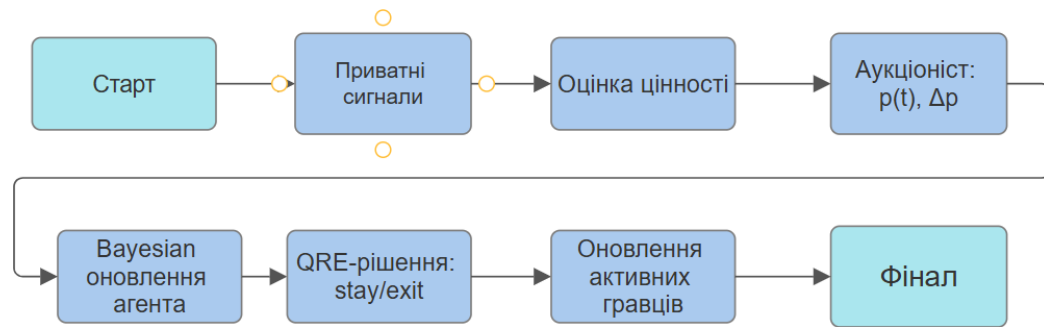


Рис. 3.1. Концептуальна структура моделі англійського аукціону з поведінковими агентами

Джерело: авторська розробка

Аукціон завершується, коли залишається лише один агент. Цей агент виграв аукціон і сплачує ціну, встановлену в фінальному раунді. Концептуально модель відтворює ланцюг інформаційних та поведінкових реакцій, де зміна ціни спонукає до перегляду оцінок, а рішення учасників поступово визначають динаміку конкуренції та кінцеву ринкову ціну. На рисунку 3.1 представлена концептуальну схему структури англійських торгів. Структура дозволяє вивчати не лише кінцевий результат аукціону, але й механізм переходів між станами, що робить модель гнучким інструментом для аналізу поведінки агентів у системах з неповною інформацією.

3.2. АЛГОРИТМ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТРУКТУРА СИМУЛЯЦІЇ

Алгоритм моделювання англійського аукціону побудований як чітка послідовність кроків, яка відтворює логіку реальних торгів. Модель працює в дискретному часі, де кожен раунд є окремим кроком зміни ціни, перегляду оцінок та прийняття рішень. Усі дії відбуваються у взаємодії трьох компонентів - аукціоніста, агентів та інформаційного середовища, що формує завершений цикл конкурентної поведінки.

Загальна логіка симуляції подається як структурований послідовний процес. Процес починається з ініціалізації. Цей крок створює початковий стан моделі: генеруються приватні сигнали учасників, розраховується спільна оцінка на основі

середнього сигналу та визначаються початкові параметри транзакції: початкова ціна, набір активних агентів та порожній журнал подій. Потім моделювання переходить у фазу раундів.

Після зміни ціни система переходить у режим перегляду індивідуальних станів агентів. На цьому етапі кожен учасник переосмислює ситуацію: якою стає його оцінка вартості товару за нових умов, наскільки ризиковою стає подальша участь, чи зберігається потенційна вигода. В основу цього покладено Bayesian-оновлення, яке дозволяє агенту наближати свою оцінку до ринкової, враховуючи, що інші гравці продовжують робити ставки при новій ціні. Фактично це етап “переоцінки реальності”, коли кожен учасник уточнює картину світу відповідно до доступних сигналів.

Далі відбувається прийняття рішень - ключова поведінкова частина алгоритму. Замість жорсткого визначення “якщо ціна \geq оцінка, то вихід”, модель використовує ймовірнісний механізм Quantal Response (Osborne & Rubinstein, 1994; Myerson, 1991). Це означає, що навіть коли торги стають маловигідними, учасник може залишитися, а іноді може вийти занадто рано. Така стохастична поведінка не просто додає реалізму. Вона дозволяє досліджувати нестандартні сценарії, коли помилки, нервові реакції чи занадто оптимістичні очікування суттєво впливають на кінцевий результат.

Після того як кожен агент зробив свій вибір, модель оновлює множину активних учасників. Саме це оновлення визначає загальну динаміку конкуренції: зменшення кількості гравців уповільнює темп підвищення ціни, зменшує невизначеність оцінки, а інколи дозволяє окремим учасникам довше залишатися в торгах, ніж це диктувала б класична раціональна модель.

Якщо після оновлення активних гравців залишається більше ніж один учасник, симуляція переходить у наступний раунд і алгоритм повторюється. Якщо ж активним є лише один гравець, аукціон завершується. На рисунку 3.2, можна побачити наглядну схему такого життєвого циклу кожного раунда

аукціона. Переможець фіксується автоматично, а система формує підсумкові значення - фінальну ціну, прибуток переможця, показники regret для учасників, які могли виграти, але вийшли раніше.

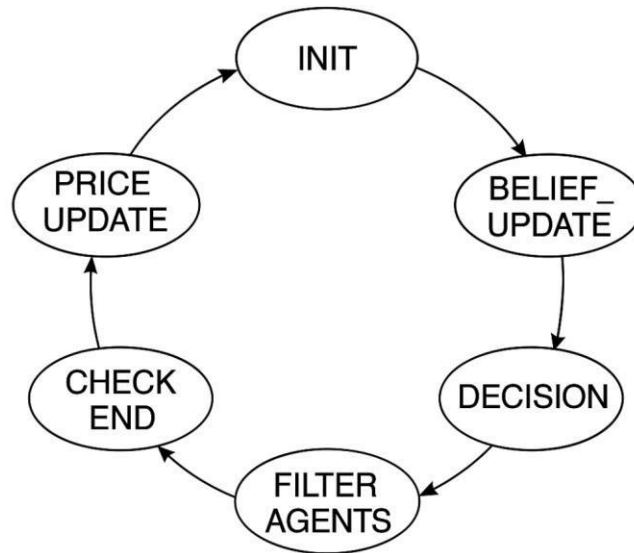


Рис. 3.2. Діаграма життєвого циклу кожного раунду в аукціоні

Джерело: авторська розробка

Ця структура забезпечує достатню гнучкість, щоб відтворювати різні сценарії торгів, і водночас достатню формалізацію, щоб результати були відтворюваними та прозорими для подальшого аналізу.

3.3. ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ

Вибір мови програмування Python для реалізації моделі симуляції аукціону обґрунтований кількома суттєвими перевагами. По-перше, Python визначається швидким розвитком: завдяки лаконічному синтаксису та великій кількості доступних бібліотек, створення складних моделей та алгоритмів відбувається набагато швидше, ніж за допомогою більшості компільованих мов. По-друге, мова проста у вивченні, а її використання не вимагає глибоких знань системного програмування, що робить її практичним інструментом як для дослідників, так і для розробників аналітичних рішень.

Python – це універсальна інтерпретована мова програмування, яка здобула

широку популярність у сферах наукових обчислень, машинного навчання, моделювання, візуалізації даних та економічного аналізу. Ця мова підтримує велику екосистему бібліотек, таких як NumPy, Pandas, Matplotlib, SciPy та багато інших, які дозволяють проводити статистичні розрахунки, працювати з великими обсягами даних та створювати графічні моделі без додаткових інструментів (NumPy Developers, 2025; Pandas Development Team, 2025; Matplotlib Development Team, 2025).

Для цієї роботи Python використовувався в середовищі Google Colab, яке надає ресурси хмарних обчислень, автоматичне налаштування середовища, підтримку графічних процесорів та можливість інтеграції коду, тексту та графіки в один документ. Це робить Google Colab практичним інструментом для проведення експериментів, візуалізації результатів та моделювання відтворюваності, що є важливим у наукових дослідженнях.

Для опису логіки системи використано псевдокод, оскільки він дозволяє подати алгоритм у максимально зрозумілому і нейтральному вигляді, без прив'язки до конкретної мови програмування. На відміну від фрагментів Python-коду, псевдокод підкреслює структуру алгоритму, а не технічні деталі реалізації, що робить його зручним для аналізу в межах економічної кібернетики.

Початковий етап (код представлений на рис. 3.3) передбачає генерацію приватних сигналів, визначення поведінкових характеристик агентів і встановлення стартової ціни. Усі учасники спочатку активні.

```
INIT_MODEL():  
    active_agents ← {}  
    for i from 1 to N:  
        agent[i].signal ← random_uniform(x_min, x_max)  
        agent[i].type ← normal or aggressive  
        agent[i].risk ← random_level()  
        add agent[i] to active_agents  
    price ← reserve_price
```

Рис. 3.3. Псевдокод ініціалізації моделі

Джерело: авторська розробка

Підвищення ціни залежить від активності торгів. Якщо залишилось багато учасників або лідирує агресивний агент, модель дозволяє більші кроки - «jump-bidding». В іншому випадку зростання ціни помірне (код представлений на рисунку 3.4).

```
UPDATE_PRICE(active_agents, price):
    leader ← random choice from active_agents
    Δp ← base_step * activity_factor(active_agents)
    if leader.type == aggressive:
        Δp ← Δp * random_jump()
    return price + Δp
```

Рис. 3.4. Псевдокод оновлення ціни

Джерело: авторська розробка

Кожен учасник оновлює власне уявлення про вартість на основі ціни та кількості активних гравців. Після цього він приймає стохастичне рішення залишитися або вийти. Рішення не детерміноване й описується логіт-механізмом (код представлений на рисунку 3.5).

```
AGENT_DECISION(agent, price, N_active):
    agent.updated_value ← BAYES_UPDATE(agent, price, N_active)
    utility ← evaluate(agent.updated_value, price, agent.risk)
    probability ← logistic(utility)
    if random() < probability:
        return stay
    else:
        return exit
```

Рис. 3.5. Псевдокод логіки агента щодо оновлення ціни та його рішення

Джерело: авторська розробка

Головна функція моделювання послідовно виконує раунди аукціону: оновлює ціну, оновлює оцінки, збирає рішення, фільтрує активних агентів, перевіряє завершення (код представлений на рисунку 3.6).

```

RUN_AUCTION():
    while count(active_agents) > 1:
        price ← UPDATE_PRICE(active_agents, price)

        for each agent in active_agents:
            if AGENT_DECISION(agent, price, count(active_agents)) == exit:
                deactivate agent

        remove inactive agents

    winner ← only remaining agent
    return winner, price

```

Рис. 3.6. Псевдокод основного циклу симуляції

Джерело: авторська розробка

Після завершення аукціону відображаються результати: переможець, остаточна ціна, окремі показники, а також журнал процесу, який використовується в розділі 4 для подальшого аналізу.

3.4. ПОБУДОВА ДІАГРАМИ РОЗГОРТАННЯ

Діаграми використання програмного забезпечення (Use Case Diagram UML) є важливим інструментом моделювання, що дозволяє чітко відобразити взаємодію між користувачем та програмною системою в контексті процесів, які вона виконує. У рамках даної роботи UML-моделювання використано для формалізації того, як саме дослідник взаємодіє з імітаційною моделлю англійського аукціону, а також для демонстрації внутрішньої логіки симуляції (Arlow & Neustadt, 2005). Це дозволяє представити складний динамічний процес торгів у доступній та структурованій формі, що важливо як для розробки, так і для подальшого аналізу моделі.

По-перше, модель використання дає можливість визначити повний перелік дій, які може виконувати користувач системи, та очікувану послідовність цих дій. У контексті моделі аукціону користувач може лише налаштовувати параметри

симуляції, запускати аукціон та переглядати результати. Таке обмеження підкреслює, що всі інші дії — оновлення оцінок, прийняття рішень агентами, розрахунок приросту ціни — виконуються автоматично всередині системи та не потребують втручання користувача. Це дозволяє виокремити функціональну роль людини та програмного середовища.

По-друге, UML-діаграма використання допомагає уточнити функціональні вимоги до моделі. Чітке розмежування між діями користувача та внутрішніми процесами системи полегшує подальшу валідацію моделі та її вдосконалення.

По-третє, модель використання виконує важливу роль у комунікації між розробником та іншими стейкхолдерами - науковим керівником, членами комісії та потенційними користувачами моделі. UML-діаграма забезпечує універсальну Це особливо корисно у випадку поведінкових моделей, де важливо висвітлити логіку процесу, а не лише технічні аспекти коду.

На рис. 3.7 наведена UML-діаграма використання для моделі англійського аукціону, яка відображає всі основні взаємодії користувача із системою та структуру внутрішніх етапів симуляції. Діаграма дозволяє наочно побачити, як саме відбувається запуск моделі, які процеси активуються всередині системи та яким чином формується кінцевий результат.

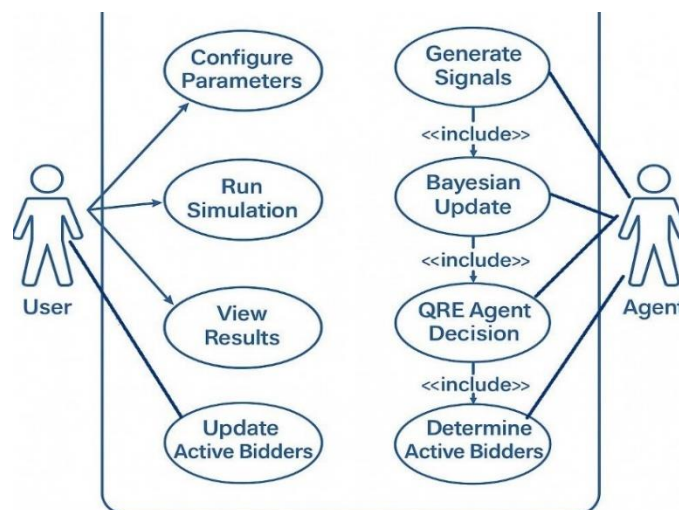


Рис. 3.7. Use-case діаграма

Джерело: авторська розробка

Окрім діаграми використання, у роботі також побудовано UML-діаграму класів, яка відображає внутрішню архітектуру програмної моделі. Діаграма класів (Class Diagram UML) дозволяє формально описати структуру симуляції: класи, їхні атрибути, методи та взаємозв'язки між ними. У випадку даної моделі ключовими є два класи - AuctionParams та BehavioralBidder, а також процедурний модуль run_behavioral_english_auction, який виконує роль контролера процесу.

Клас AuctionParams містить усі параметри моделі, включно з кількістю учасників, діапазоном сигналів, параметрами поведінкової логіки та характеристиками динаміки ціни. Клас BehavioralBidder описує агента: його приватний сигнал, тип поведінки, рівень ризик-аверсії, методи Bayesian-updating та обчислення ймовірності залишення в торгах. Така архітектура забезпечує модульність та гнучкість моделі: зміну параметрів або логіки поведінки агентів можна здійснити без необхідності модифікації всього коду.

Діаграма класів (представлена на рисунку 3.8) наочно демонструє зв'язок між об'єктами: агенти використовують параметри аукціону, а основна функція симуляції створює їх та керує їхніми взаємодіями. Це дозволяє чітко представити внутрішню структуру моделі й підкреслює системний характер розробленого рішення.

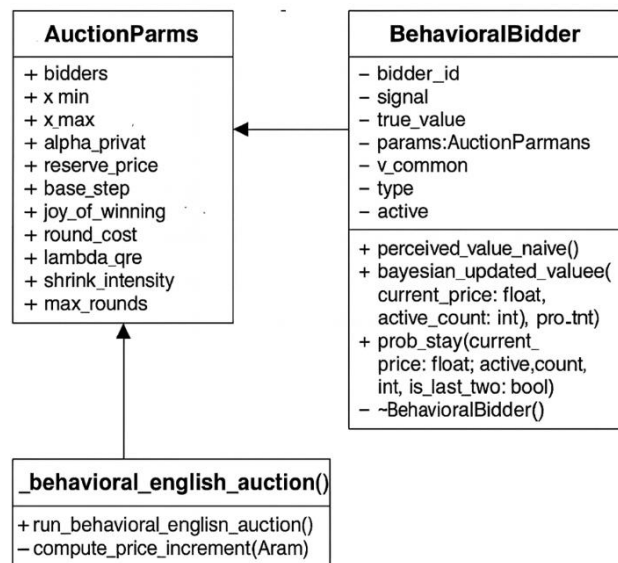


Рис. 3.8. Діаграма класів

4. ОПИС ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЇ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ

4.1. ОПИС РОБОТИ З ПРОГРАМНИМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ

Розроблений застосунок доступний у браузері під окремою адресою Google Colab. Ця адреса розповсюджується на будь-який браузер. Стартове вікно застосунку зображене на рис. 4.1. На ньому зображена основна сторінка, де користувач може побачити програмний код застосунку, ввести кількість учасників та запустити симуляцію торгів.

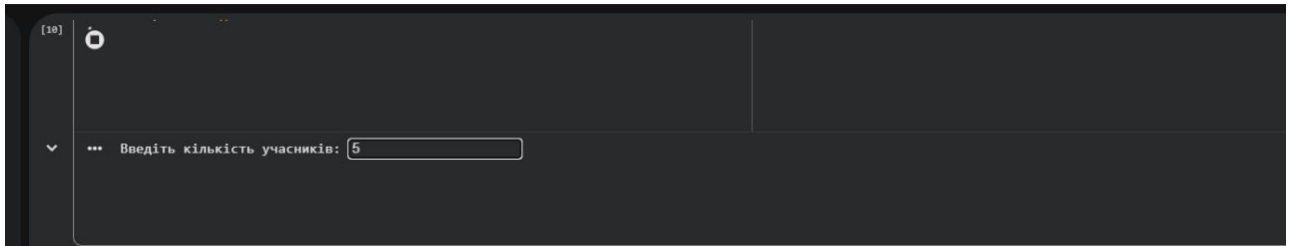


Рис. 4.1. Основне вікно симуляції

Джерело: авторська розробка

Загалом, інтерфейсу модель не має та виглядає мінімалістично. У межах моделювання було проведено симуляцію англійського аукціону за участю п'яти поведінкових агентів. Мета - дослідити динаміку торгів, реакції учасників на зміну ціни та вплив поведінкових факторів (ризик-аверсія, Bayesianоновлення, ефект winner's curse).

Після запуску програма попросить користувача ввести кількість учасників аукціону ті після виконання одразу покаже результати імітації разом з усіма представленими нижче графіками. Для простоти і меншого часу виконання, введемо кількість – п'ять учасників і побачимо результат (продемострований на рисунку 4.2).

```

*** Введіть кількість учасників: 5

=== ХІД АУКЦІОНУ ===
   round      price  active_bidders  dropped
0       1  50.000000  [1, 2, 3, 4, 5]    []
1       2  52.288760  [2, 3, 4, 5]     [1]
2       3  54.632039  [2, 3, 4, 5]     []
3       4  56.837948  [2, 3, 4, 5]     []
4       5  59.343116  [2, 3, 4, 5]     []
5       6  61.642675  [2, 3, 4, 5]     []
6       7  64.129576  [2, 3, 4, 5]     []
7       8  66.493700  [2, 3, 4, 5]     []
8       9  68.921886  [2, 3, 4, 5]     []
9      10  71.351471  [2, 3, 4, 5]     []
10     11  73.561096  [2, 4, 5]        [3]
11     12  75.686392  [2, 4, 5]        []
12     13  78.018852  [2, 4, 5]        []
13     14  80.297371  [2, 4, 5]        []
14     15  82.404702  [2, 4, 5]        []
15     16  84.663024  [2, 4, 5]        []
16     17  87.000093  [2, 4, 5]        []
17     18  89.348203  [2, 4, 5]        []
18     19  91.640905  [2, 4, 5]        []
19     20  93.940069  [2, 4, 5]        []
20     21  96.111161  [2, 4, 5]        []
21     22  98.340392  [2, 4, 5]        []
22     23 100.522363  [2, 4, 5]        []
23     24 102.764637  [2, 4, 5]        []
24     25 105.131782  [2, 4, 5]        []
25     26 107.398527  [2, 4, 5]        []
26     27 109.647363  [2, 4, 5]        []
27     28 111.919482  [2, 4, 5]        []
28     29 114.234428  [2, 4, 5]        []
29     30 116.326393  [2, 4, 5]        []

Загальна цінність (V_common): 156.64

```

Рис. 4.2. Результат імітації англійського аукціону з п'ятьма учасниками по раундах
Джерело: авторська розробка

На початку всі п'ять учасників залишаються активними, однак уже на другому раунді аукціон покидає агент 1. Це типовий результат, високоагресивні гравці з низькою ризик-аверсією часто або “стрибають” у торги агресивно, або швидко виходять, якщо оновлена оцінка різко знижується. На рисунку 4.3 можна побачити графік вибування гравців.

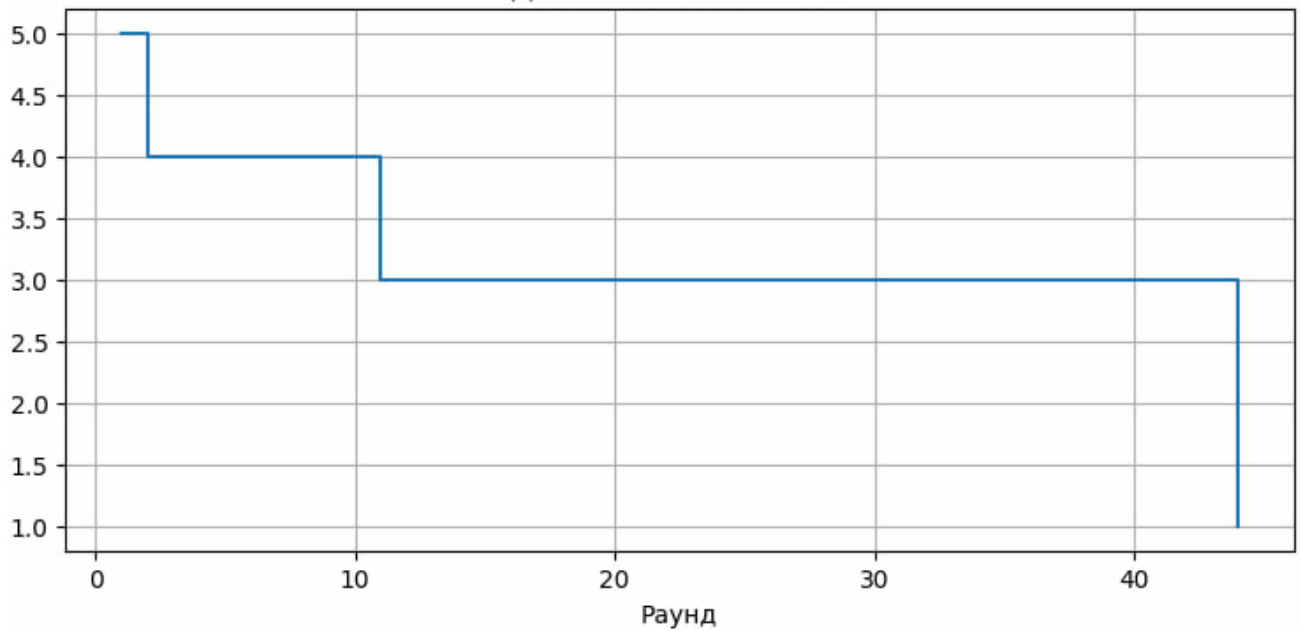


Рис. 4.3. Динаміка вибування учасників

Джерело: авторська розробка

Така поведінка узгоджується з теорією англійських аукціонів — більшість гравців затримуються доти, доки поточна ціна не наблизиться до їх оновленої оцінки (Bayesian-updated value).

Ціна (продемонстрована на рисунку 4.4) зростає плавно, майже лінійно - від стартових 50 до 147.84. Стрибків немає, бо лідируючим учасником найчастіше був нормальний тип (без jump-bidding). Така поведінка відповідає класичній логіці торгів із помірною конкуренцією.

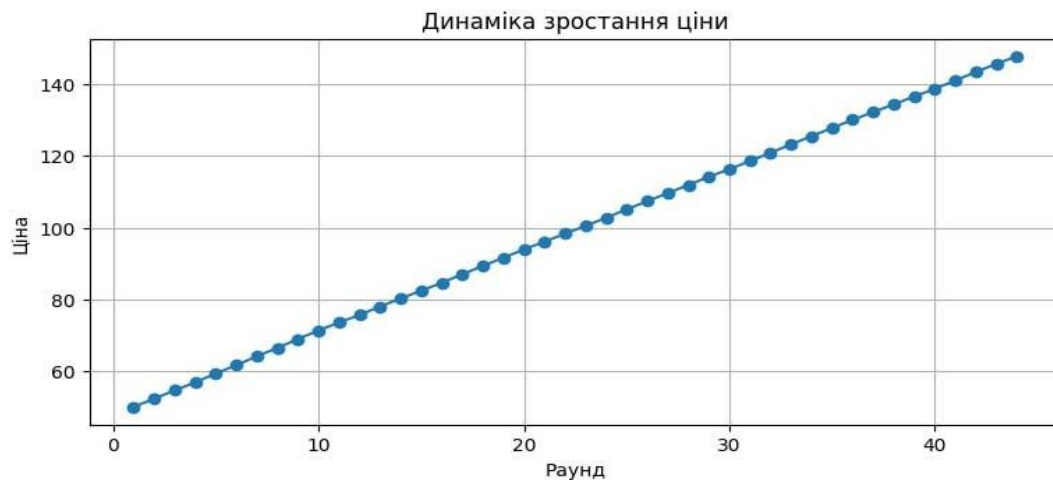


Рис. 4.4. Динаміка зростання ціни

Джерело: авторська розробка

Переможець -учасник №4, тип normal. Результати аукціону показані на рисунку 4.5. Його сигнал становив 145.52, а істинна цінність = 153.31. З ключових моментів - оновлена оцінка протягом торгів поступово збільшується, наближаючись до спільної цінності, ціна надоганяє оцінку переможця лише в кінці, але не перетинає її. Також різниця між true value і price залишається позитивною, що дає прибуток 5.47. У висновку можна стверджувати, що переможець не постраждав від прокляття переможця, оскільки його оцінка та істинна цінність залишалися вищими за фінальну ціну.

```

Загальна цінність (V_common): 156.64
Переможець: учасник 4, тип: normal
Його сигнал x: 145.52
Його істинна цінність v_true: 153.31
Фінальна ціна p*: 147.84
Реальний прибуток переможця: 5.47

=== Таблица учасників ===
Bidder      Type      Risk aversion  Signal x_i  True value v_i  Naive value \
0           1  aggressive      0.30      192.60      167.43      192.60
1           2   normal         0.24      153.44      155.68      153.44
2           3  aggressive      0.52      153.37      155.66      153.37
3           4   normal         0.90      145.52      153.31      145.52
4           5   normal         0.45      138.30      151.14      138.30

Profit (v_i_true - p*)  Regret
0                      0.00   19.60
1                      0.00   7.85
2                      0.00   7.83
3                      5.47   0.00
4                      0.00   3.31

```

Рис. 4.5. Результати та переможець аукціону

Джерело: авторська розробка

Графік розсіювання (продемонстрований на рисунку 4.6) показує, що сигнал переможця не був найвищим у групі (агент 1 мав 192.6). Але його істинна цінність була однією з найвищих, завдяки високому спільному компоненту. Також, переможець мав найнижчу ризик-аверсію (0.90), отже більш схильний до залишення у торгах.

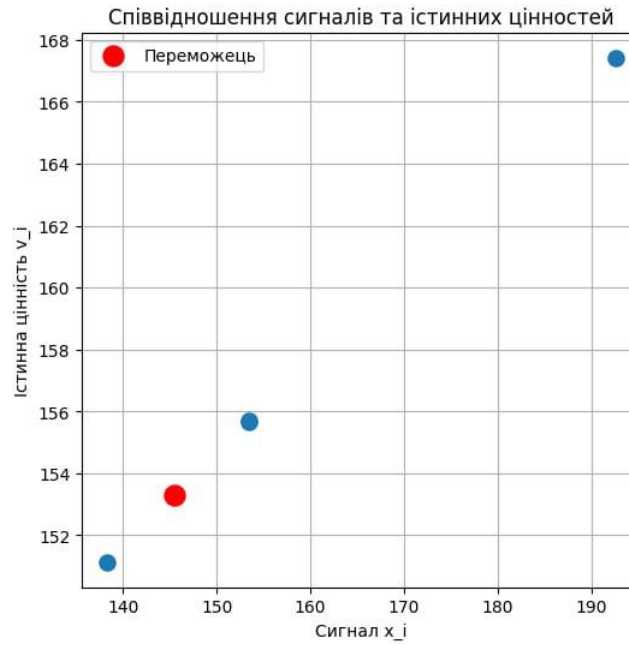


Рис. 4.6. Графік розсіювання сигналів

Джерело: авторська розробка

Це ілюструє поведінковий аспект: не завжди “оптимістичний” сигнал гарантує перемогу. Важливим стає саме Bayesian-оновлення.

Щодо прибутку та жалю по втраченій вигоді (показаний на рисунку 4.7), найвищий regret спостерігається у учасника 1 - він мав найвищий сигнал (192.6), але через агресивний тип і можливу переоцінку ризику вийшов занадто рано. Гравці 2, 3 і 5 також мають regret. Їх істинні оцінки були вищими за фінальну ціну, тобто вони могли виграти з прибутком, але вийшли передчасно (через поведінковий QRE-механізм).



Рис. 4.7. Графік розподілення regret

Джерело: авторська розробка

Бар-діаграма показує прокляття переможця (представлена на рисунку 4.8) показує, що сигнал переможця = 145.52, істинна цінність = 153.31 фінальна ціна = 147.84 Тут прокляття переможця відсутнє, оскільки ціна не перевищила ні переоцінену, ні істинну вартість для переможця. У разі дослідження 100 прогонів цей показник можна аналізувати кількісно.

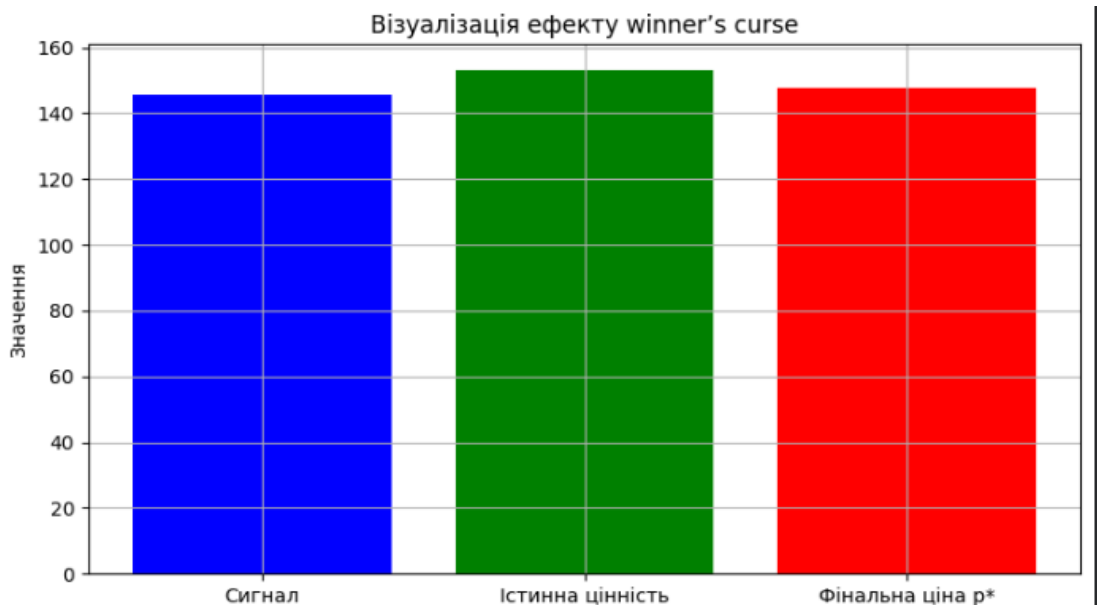


Рис. 4.8. Візуалізація прокляття переможця

Джерело: авторська розробка

Експеримент підтверджує адекватність поведінкової моделі: динаміка виходу учасників узгоджується з відомими результатами попередніх досліджень, а ціна зростає плавно й послідовно, що є характерною рисою англійського аукціону. Переможець у цьому прогоні не мав найвищого сигналу, проте його істинна оцінка виявилася майже максимальною, що логічно пояснює його перемогу. Показники regret у інших учасників відтворюють реалістичні прояви нерішучості та невпевненості, притаманні людям у подібних ситуаціях. У цій конкретній симуляції прокляття переможця не проявляється. Сукупність отриманих графіків дає змогу глибоко осягнути структуру торгів і поведінкові патерни учасників, демонструючи внутрішню логіку процесу.

4.2. ПЕРЕВІРКА РОЗРОБЛЕНОЇ МОДЕЛІ АНГЛІЙСЬКОГО АУКЦІОНУ НА ДОСТОВІРНІСТЬ

Для оцінки стабільності та правдоподібності поведінкової моделі англійського аукціону було проведено 100 незалежних прогонів із фіксованими параметрами та 5 учасниками. Це дозволило дослідити закономірності, які не завжди помітні в одному конкретному запуску: розподіл фінальних цін, середню прибутковість переможця, частоту ефекту winner's curse, а також величину regret серед учасників. На рисунках 4.9-4.13 показані статистика та графіки, які були отримані у ході перевірки.

```

=== Загальна статистика по 100 прогонах ===

```

	run	final_price	winner_id	winner_signal	winner_true_value	\
count	98.000000	98.000000	98.000000	98.000000	98.000000	
mean	49.520408	111.769240	2.806122	153.445394	130.424616	
std	29.269889	24.856537	1.482949	29.956011	18.884864	
min	0.000000	57.333293	1.000000	65.632600	76.038272	
25%	24.250000	92.008869	1.000000	134.046070	119.695502	
50%	49.500000	112.628223	3.000000	154.569263	132.353558	
75%	74.750000	131.367224	4.000000	177.516363	143.255463	
max	99.000000	173.411823	5.000000	199.600514	173.060619	

	second_true_value	winner_curse	winner_profit	mean_regret	max_regret
count	98.000000	98.000000	98.000000	98.000000	98.000000
mean	127.467290	0.183673	18.655376	10.860327	22.803980
std	21.570672	0.389209	21.731684	14.328947	22.358844
min	81.325334	0.000000	-23.357996	0.000000	0.000000
25%	114.822717	0.000000	1.620863	1.390000	5.592500
50%	126.182779	0.000000	14.870031	3.560000	14.835000
75%	143.099545	0.000000	32.094316	17.719000	38.077500
max	169.688209	1.000000	77.120704	65.710000	91.880000

Рис. 4.9. Загальна статистика після 100 прогонів

Джерело: авторська розробка

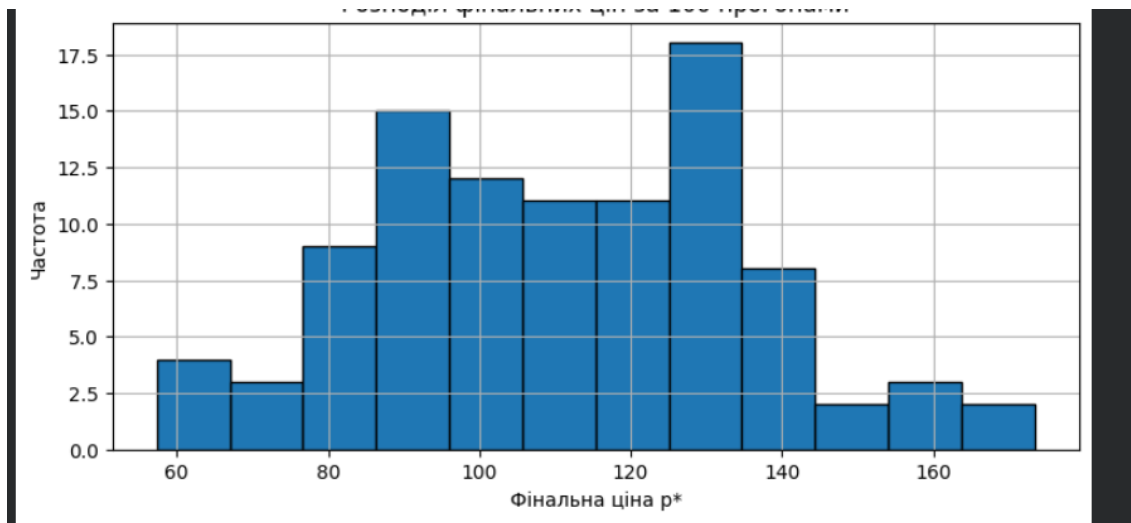


Рис. 4.10. Розподіл фінальних цін

Джерело: авторська розробка



Рис. 4.11. Ймовірність ефекту прокляття переможця

Джерело: авторська розробка



Рис. 4.12. Середній regret

Джерело: авторська розробка

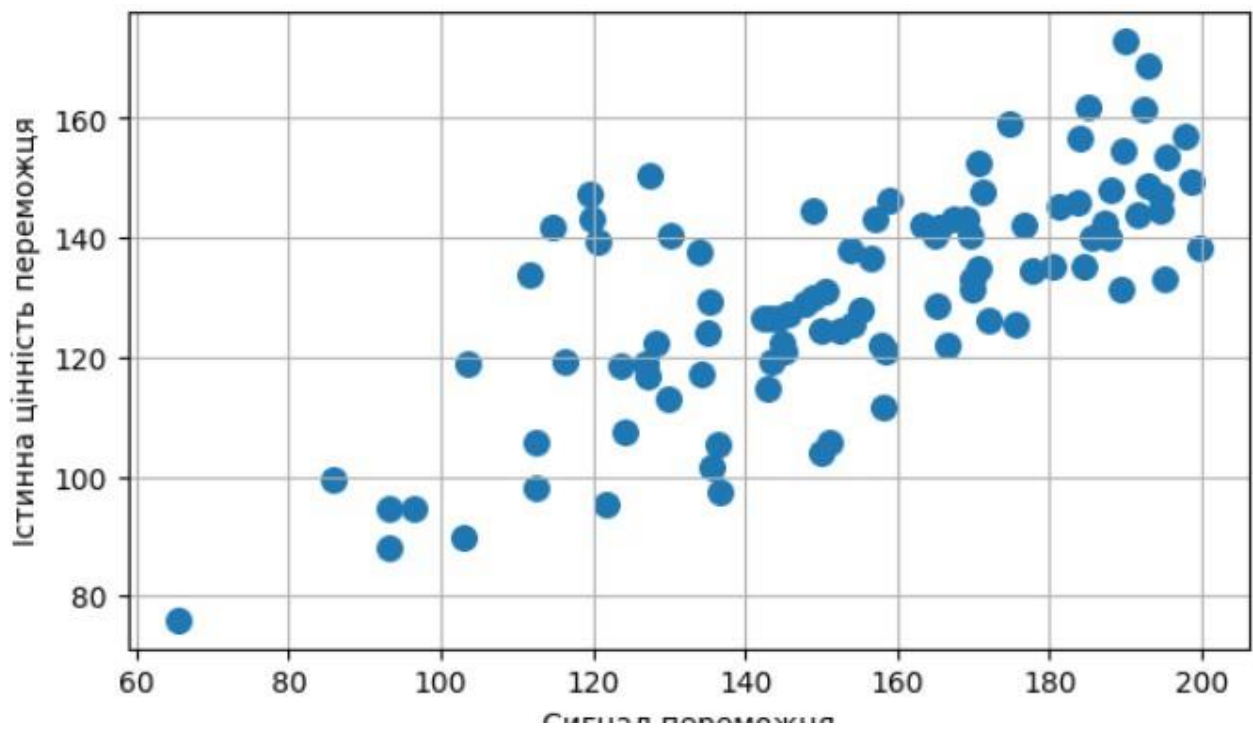


Рис. 4.13. Розподілення сигналу переможця проти істинної цінності

Джерело: авторська розробка

Отримані результати демонструють, що поведінкова модель англійського

аукціону працює реалістично й узгоджується з економічною теорією. Фінальні ціни мають широкий діапазон і значну варіативність, що відображає вплив поведінкових факторів та різного рівня конкуренції. Там, де більше агресивних учасників, ціна зростає швидше й завершується на вищих рівнях, тоді як випадки низьких фінальних цін виникають через передчасний вихід окремих гравців, спричинений випадковими логіт-помилками.

Аналіз переможців показує, що середня їхня істинна оцінка перевищує фінальну ціну, а отже, у більшості випадків вони отримують позитивний прибуток. Водночас майже у п'ятій частині симуляції спостерігається ефект *winner's curse*, а отже переможець переплачує та зазнає збитку. Це відповідає класичним результатам досліджень *common value* аукціонів і підтверджує, що навіть за умов наявності раціональних механізмів учасники схильні до поведінкових помилок.

Сигнали переможців у середньому значно перевищують істинну вартість, що вказує на їхню природну оптимістичність. Саме найбільш оптимістичний учасник найчастіше перемагає - це ключовий механізм, який породжує *winner's curse*. Водночас високий рівень *regret* серед усіх учасників свідчить про часті помилки в стратегіях: гравці або виходять занадто рано, втрачаючи потенційний прибуток, або залишаються надто довго й переплачують. Це доречно ілюструє обмежену раціональність і психологічні ефекти, властиві реальним торгам.

Порівняння фінальної ціни з другим найвищим істинним значенням показує, що ціна зазвичай нижча, оскільки учасники обережні через ризик переплати. Проте інколи ціна піднімається вище раціонального рівня через агресивні стрибки ставок. Така поведінкова мінливість підкреслює, що ціна формується не лише економічними параметрами, а й психологією та стратегічними реакціями гравців.

У підсумку модель демонструє правдоподібну взаємодію інформаційної асиметрії, обмеженої раціональності та конкуренції. Вона підтверджує, що у

common value аукціонах учасники рідко поводяться оптимально, а поведінкові фактори суттєво впливають на результати, роблячи ринок одночасно ефективним щодо агрегації інформації, але вразливим до переплат і неефективних рішень.

4.3. ЕКОНОМІЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

Розроблена поведінкова імітаційна модель англійського аукціону відтворює процес ціноутворення та ухвалення рішень у середовищі з інформаційною асиметрією, спираючись на підхід common value. Усі учасники мають спільну істинну цінність товару, але їхні початкові приватні сигнали можуть істотно відхилятися від реальності, створюючи невизначеність, поведінкові помилки та ризик переплати. Зростання ціни у моделі відповідає класичній динаміці англійського аукціону, але темп цього зростання визначається поведінковими характеристиками агентів: агресивні гравці пришвидшують рух до високих ставок, тоді як обережні учасники підтримують плавний темп торгів. Така поведінка демонструє, як індивідуальні установки та рівень конкуренції формують підсумкову ринкову ціну.

Система Bayesian-оновлення дозволяє учасникам коригувати свої оцінки відповідно до поведінки конкурентів, що імітує реальний механізм ринкового “витягування” інформації та веде до поступового зближення ставок з істинною вартістю. Разом із тим у моделі помітний класичний ризик winner’s curse: більш оптимістичні учасники мають підвищену ймовірність перемоги, але можуть переплатити, тоді як надто обережні гравці інколи виходять зарано та в подальшому відчують regret. Ці поведінкові ефекти узгоджуються з теоретичними та експериментальними результатами й показують, що реальна ринкова поведінка часто відхиляється від раціональної.

Модель демонструє важливість конкуренції для ефективності ціноутворення: чим більше учасників, тим точніше відображається істинна вартість. За низької конкуренції ціна частіше зупиняється на менш ефективному

рівні. Сукупно результати підтверджують, що аукціони слугують механізмом інформаційної агрегації, але водночас залишають простір для поведінкових викривлень, які можуть погіршувати ефективність розподілу ресурсів. Модель також дає можливість оптимізувати правила торгів - зокрема обмежити різкі стрибки ставок або підвищити прозорість, щоб зменшити ризик переплати та підвищити загальну ефективність аукціонів.

4.4. МОЖЛИВІ НАПРЯМИ ВДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ

Розроблена імітаційна модель вже успішно відтворює основні закономірності англійських аукціонів та демонструє поведінкові характеристики, типові для реальних торгів. Однак, за наявності більших ресурсів та часу, її можна було б значно розширити, перетворившись з локальної симуляції на комплексний інтерактивний інструмент для досліджень в економічній кібернетиці.

Перспективним початковим підходом є створення онлайн-версії симулятора. У цьому сценарії існуючий код Python став би серверним компонентом системи, відповідальним за генерацію приватних сигналів, розрахунок оновлень, керування переходом між раундами, динаміку цін та запис історії торгів. Всі обчислення виконувалися б у режимі реального часу на сервері. Сучасний веб-інтерфейс, заснований на React, можна було б розробити поверх серверної логіки. Цей інтерфейс пропонував би швидку анімацію транзакцій, візуалізацію графіків у режимі реального часу, зручні панелі керування параметрами моделі та можливість взаємодії з користувачами. Для забезпечення миттєвого оновлення стану аукціону доцільно використовувати WebSockets, які дозволяють відображати зміни цін, вилучення учасників та оновлені оцінки так само швидко, як і на електронних торгових платформах.

Онлайн-версія симулятора пропонуватиме можливість поєднання комп'ютерних та людських агентів. Це дозволить проводити експериментальні

дослідження, наприклад, порівнюючи поведінку учасників-людей з поведінкою алгоритмічних агентів, або вивчаючи вплив психологічного тиску, агресивності аукціонів чи небажання ризикувати. Для освітніх цілей така система може служити симулятором, що ілюструє механізми конкурентних аукціонів для студентів, а для дослідників - лабораторією для поведінкових експериментів.

Таким чином, модель має потенціал для еволюції від прототипу дослідницького програмного забезпечення до повністю інтерактивного веб-додатку. Така трансформація значно підвищить практичну цінність роботи та створить інструмент, який можна використовувати як у навчанні, так і в економічних дослідженнях.

ВИСНОВКИ

У ході кваліфікаційної магістерської роботи було проведено всебічне дослідження англійського аукціону з погляду економічної кібернетики та поведінкової економіки, а також створено імітаційну модель, яка правдоподібно відтворює динаміку торгів в умовах неповної інформації. Теорія, побудова концепції, програмування та експериментальна перевірка дали змогу побачити аукціон як цілісну систему й зрозуміти, як насправді формуються ціни та приймаються рішення учасниками.

Теоретичний аналіз показав, що саме англійський аукціон найкраще підходить для виявлення поведінкових ефектів: у ньому природно простежуються зміни очікувань, реакція на конкуренцію та класичне “прокляття переможця”. Вивчення моделей приватних і спільних цінностей, рівноваг Bayesian Nash та ідей Milgrom-Weber допомогло визначити, які елементи потрібно адаптувати, щоб модель наблизилась до реальної поведінки людей.

Програмна реалізація на Python вийшла гнучкою та зрозумілою: агенти поведуться по-різному, рішення приймаються з певною імовірністю, ціна змінюється динамічно, а всі дані збираються для подальшого аналізу. Окремі симуляції одразу показали знайомі ефекти: перемогу надто оптимістичних гравців, переплати через агресивні ставки, плавні та раптові стрибки ціни, а також те, як момент виходу з торгів впливає на відчуття жалю. Сто прогонів моделі підтвердили її узгодженість із теорією та експериментальними результатами: більше учасників - вища ціна, “прокляття переможця” трапляється приблизно у 20% випадків, а поведінкові відхилення чітко проявляються у розподілі результатів.

Модель добре показує ключові закономірності аукціонів, перемагає зазвичай той, хто найоптимістичніше оцінює лот. Фінальна ціна тяжіє до середнього сигналу, але може відхилитися через емоції та ризиковість, а

учасники з низькими оцінками швидко припиняють торги. Усе це підтверджує, що модель відтворює не лише “книжкову” теорію, а й реальну людську поведінку.

У підсумку вдалося повністю досягти мети: створена модель є живою, реалістичною та гнучкою, добре поєднує теорію і поведінкові ефекти й може слугувати основою для подальших досліджень, навчальних симуляцій або розробки інтерактивних інструментів.

Модель наочно демонструє фундаментальні закономірності: переможцем найчастіше виявляється найбільш оптимістичний агент, підсумкова ціна прагне середнього сигналу, але може відхилятися через поведінкові особливості, а учасники з низькими оцінками швидко вибувають. Отримані результати підтверджують валідність підходу та демонструють можливість використання моделі як інструменту для вивчення поведінки ринку, навчання або подальшого розвитку у вигляді інтерактивної програми.

В результаті роботи було повністю досягнуто поставленої мети: створено гнучку та реалістичну імітаційну модель англійського аукціону, яка коректно поєднує теоретичні закономірності та поведінкові ефекти і може бути основою для подальших прикладних досліджень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Arlow, J., & Neustadt, I. (2005). UML 2 and the Unified Process: Practical Object-Oriented Analysis and Design. Boston, MA: Addison-Wesley.
2. Arthur, W. B. (2014). Complexity and the economy. Oxford: Oxford University Press.
3. Camerer, C. F. (2003). Behavioral game theory. Princeton, NJ: Princeton University Press.
4. Epstein, J. M. (2006). Agent-based computational models. Princeton, NJ: Princeton University Press.
5. European Commission. (2023). Публічні закупівлі — цифрові інструменти. Retrieved from <https://single-market-economy.ec.europa.eu/>
- European Commission. (2023). Public procurement – digital tools. Retrieved from <https://single-market-economy.ec.europa.eu/>
6. Fudenberg, D., & Levine, D. (1998). The theory of learning in games. Cambridge, MA: MIT Press.
7. Google Research. (2023). Auctions & market design. Retrieved from <https://research.google/teams/market-algorithms/>
8. IBM Developer. (2023). UML basics: The class diagram. Retrieved from <https://developer.ibm.com/articles/the-class-diagram/>
9. Kagel, J. H., & Levin, D. (2002). Common value auctions and the winner's curse. Princeton, NJ: Princeton University Press.
10. Kahneman, D. (2011). Thinking, fast and slow. New York, NY: Farrar, Straus and Giroux.
11. Klemperer, P. (2004). Auctions: Theory and practice. Princeton, NJ: Princeton University Press.
12. Krishna, V. (2009). Auction theory. Boston, MA: Academic Press.
13. Marshall, A. (1890). Principles of economics. London: Macmillan.

14. McAfee, P., & McMillan, J. (1987). Auctions and bidding. *Journal of Economic Literature*, 25(2), 699–738. DOI: 10.2307/2726107
15. Milgrom, P., & Weber, R. (1982). A theory of auctions and competitive bidding. *Econometrica*, 50(5), 1089–1122. DOI: 10.2307/1911865
16. Myerson, R. B. (1991). *Game theory: Analysis of conflict*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
17. National Bureau of Economic Research. (2023). Auction theory papers. Retrieved from <https://www.nber.org/search?terms=auction>
18. NumPy Developers. (2025). NumPy documentation. Retrieved from <https://numpy.org/doc/>
19. OECD. (2023). Government at a glance – public procurement indicators. Retrieved from <https://www.oecd.org/gov/government-at-a-glance-22214399.html>
20. OMG – Object Management Group. (2023). Unified Modeling Language specification. Retrieved from <https://www.omg.org/spec/UML/>
21. Osborne, M. J., & Rubinstein, A. (1994). *A course in game theory*. Cambridge, MA: MIT Press.
22. Pandas Development Team. (2025). Pandas documentation. Retrieved from <https://pandas.pydata.org/docs/>
23. Prozorro. (2025). Prozorro. Офіційний портал публічних закупівель України. Retrieved from <https://prozorro.gov.ua/>
- Prozorro. (2025). Official public procurement system of Ukraine. Retrieved from <https://prozorro.gov.ua/>
24. Python Software Foundation. (2025). Python documentation. Retrieved from <https://docs.python.org/3/>
25. Roth, A. E. (1988). *The Shapley value: Essays in honor of Lloyd S. Shapley*. Cambridge: Cambridge University Press.
26. ScienceDirect. (2023). Auction theory and behavioral economics collection. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and->

finance/auction-theory

27. Simon, H. A. (1957). *Models of man: Social and rational*. New York, NY: Wiley.
28. Sotheby's Institute of Art. (2023). Auction market analysis. Retrieved from <https://www.sothebysinstitute.com/news-and-events/>
29. Stanford University. (2022). Auction theory. Retrieved from <https://web.stanford.edu/~jdlevin/Econ%20286/Auctions.pdf>
30. SSRN. (2023). Papers on auctions and bidding. Retrieved from <https://ssrn.com/>
31. Sutton, J. (1998). *Technology and market structure*. Cambridge, MA: MIT Press.
32. Tesfatsion, L., & Judd, K. (2006). *Agent-based computational economics*. Amsterdam: Elsevier.
33. Tirole, J. (1988). *The theory of industrial organization*. Cambridge, MA: MIT Press.
34. Varian, H. R. (2010). *Intermediate microeconomics*. New York, NY: W.W. Norton & Company.
35. Vickrey, W. (1961). Counterspeculation, auctions, and competitive sealed tenders. *Journal of Finance*, 16(1), 8–37. DOI: 10.2307/2977630
36. Wilson, R. (1997). *Nonlinear pricing*. Oxford: Oxford University Press.
37. Matplotlib Development Team. (2025). Matplotlib documentation. Retrieved from <https://matplotlib.org/stable/>
38. Christie's. (2025). Market insights & reports. Retrieved from <https://www.christies.com/en/stories/market-insights>