

## ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ СИСТЕМНОЇ ДИНАМІКИ

У роботі проведено аналіз методів та підходів імітаційного моделювання, розглянуті їх можливості, переваги, недоліки та області застосування. Визначено та описано два ключові підходи імітаційного моделювання, а саме системну динаміку та агентне моделювання. Розкрито їх сутність та області застосування, доцільність використання для прикладних задач. Звернено увагу на можливості поєднання цих методів, а також використання комбінованого підходу в контексті прикладного середовища моделювання, зокрема в рамках платформи AnyLogic. Такий підхід дозволяє розглянути поведінку системи, що складається з підсистем. Детально проаналізовано взаємодію системної динаміки та агентного моделювання, виявлено можливості оптимізації та удосконалення процесів моделювання. Розглянуто імітаційне моделювання прикладних задач економічного напрямку, особливості створення економічних моделей та їх перехід до математико-економічних структур. Визначено ключові проблеми, що виникають при моделюванні економічних систем, та сформульовано чіткі правила для їх усунення, сприяючи поліпшенню точності та адекватності моделей. В роботі наведено конкретний приклад моделювання економічної системи України на основі статистичних даних за період 2019-2022 років. Використана математична модель Солоу, а її коефіцієнти виведено на основі офіційних даних. Побудовано просторові системно-динамічні діаграми процесів в державній економіці, розроблено динамічні імітаційні моделі, використовуючи платформу AnyLogic. Здійснено формальний опис моделі економічного зростання, включаючи деталізований опис взаємозв'язків у моделі. Проведено експеримент для визначення оптимальної норми накопичення, враховуючи концепцію "золотого правила". Отримані результати експерименту важливі для розуміння та вдосконалення економічних стратегій.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, системна динаміка, агентне моделювання, модель Солоу, концепція золотого правила, економіко-математична модель, середовище AnyLogic, комп'ютерний експеримент.

**Постановка проблеми.** Проведення економічних експериментів, а також аналіз динамічних систем економічного напрямку є складним та ризикованим тому рідко застосовується на практиці. Тож на сьогодні актуальною є задача використання альтернативних способів дослідити вплив окремих факторів на динаміку економічних систем. До таких методів відноситься імітаційне моделювання, що дозволяє за розробленою математичною моделлю відтворити поведінку системи в часі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Математична школа зробила важливий внесок у моделювання ринкової економіки вже о 19-му столітті (Л. Вальрас, О. Курно, В. Парето, Ф. Еджуорт). Поняття моделі використовували Ф. Кене (1758, "Економічні таблиці") та Д. Рікардо (моделі міжнародної торгівлі) для ілюстрації та дослідження. Процеси моделювання набули широкого застосування, особливо у вивченні економічних процесів та явищ. Особливо широкого застосування процеси моделювання набули у вивченні економічних процесів та явищ у середині 20-го століття, коли виникло багато нових математичних напрямків та були розроблені інноваційні технології (комп'ютери).

Моделювання на сучасному етапі розвитку науки є одним із найдієвіших і перспективних інструментів вивчення складних явищ і процесів [1-2]. Моделюванням

## Інформаційні технології

економічних явищ та процесів займалися багато вчених. Зокрема, методи моделювання бізнес-процесів описані в працях з методології моделювання бізнес-процесів, багатокритеріального моделювання в прийнятті рішень, економетричне моделювання залежностей між макроекономічним станом України та обсягами залучених депозитів.

Моделюванню і прогнозуванню розвитку і функціонування соціально-економічної системи регіону присвячені численні наукові дослідження зарубіжних і вітчизняних вчених. В рамках реалізації вони відображають теоретичні та методологічні основи підходи та методи прогнозування розвитку регіону [3]. Існують такі підходи до регіонального прогнозування як практичний підхід, заснований на моделях національного рівня та регіональний підхід [4-5]. Останнє безпосередньо пов'язане з розробкою просторових і метрологічних моделей економічних прогнозів для регіону. Автори зосереджують увагу на економічному розвитку країн, регіонів та організацій. Розглядаються інвестиції в людський капітал як можливість забезпечення сталого економічного зростання в країні; використовують вертикальний, горизонтальний та кореляційно-регресійний аналіз для оцінювання та моделювання корпоративної діяльності [6].

**Мета дослідження.** Метою роботи є огляд підходів та інструментів імітаційного моделювання, системно-динамічного та агентного підходу до моделювання та дослідження доцільності використання імітаційного моделювання в економіці.

**Основний матеріал дослідження.** Моделювання систем та підходи до симуляції, такі як моделювання динаміки систем на макрорівні та моделювання на основі агентів на мікрорівні, широко використовуються в природничих і суспільних науках для опису динаміки складних явищ. Це охоплює оцінку навколишнього середовища, екологічні та природні системи, біологію, економіку та інші соціальні науки. Загалом, системно-математичне моделювання, яке ґрунтується на звичайних диференціальних рівняннях, моделює систему на загальному рівні з фокусом на причинно-наслідкових відносинах та зворотному зв'язку, описуючи систему в термінах змінних стану та їхніх швидкостей зміни відносно часу. Натомість агентне моделювання розглядає систему не на загальному рівні, а на рівні її складових одиниць, або "агентів", та досліджує макро-поведінку, що виникає з мікрорівневих динамічних взаємодій між агентами.

Відповідно до системної динаміки, складні системи складаються з багатьох змінних, які взаємодіють один з одним через зворотний зв'язок петель, які в свою чергу можуть взаємодіяти між собою. Система визначається кордонами, всередині яких містяться всі важливими взаємодіючі елементи. Всередині системи визначаються всі петлі позитивного і негативного зворотного зв'язку. Для всіх циклів і взаємодій між ними вони описують кількісні та якісні характеристики. Система також визначає «точки застосування», в яких можна втручатися в процеси і змінювати поведінку системи.

Методологія системної динаміки включає якісні та кількісні етапи. На якісному етапі описується модель і визначаються характеристики взаємодій. На кількісному етапі під час комп'ютерного моделювання визначається, чи правильна модель, проводиться тестування гіпотез про поведінку системи.

У системній динаміці виділяють такі інструменти:

- причинно-наслідкові діаграми (діаграми казуальних петель зворотного зв'язку);
- імітаційні моделі (simulation) - математичні моделі систем, створені за допомогою спеціального програмного забезпечення.

Серед недоліків системної динаміки визначається складність визначення основних складових системи та зв'язків між ними, адже при недостатній чи навпаки надмірній кількості залежних змінних ми ризикуємо втратити адекватність моделі. Для достовірного визначення про існування причинно-наслідкового зв'язку необхідно показати, що зміна одного фактору

## Інформаційні технології

(причини) неминуче тягне за собою зміну іншого (наслідок), тобто, що зміна першого фактору необхідна і достатня для зміни другого.

Важливо також пам'ятати, що відношення між змінними може бути неоднозначним - наприклад, нелінійним. При цьому інтенсивність реакції не завжди пропорційна інтенсивності впливу - наприклад, пропорційне збільшення заробітної плати не призводить до пропорційного збільшення мотивації персоналу. Наявність відкладених ефектів може ще більше ускладнити аналіз. Нарешті, багато явищ і подій є результатом взаємодії декількох причин. Все це важливо враховувати при побудові причинно-наслідкових діаграм.

Агентне моделювання (англ. agent-based model, АВМ) — один з класів обчислювальних моделей для цифрового моделювання дій або взаємодії автономних агентів. Агентами можуть виступати індивідуальні та колективні сутності, наприклад, групи або організації. Метою моделювання на основі агентів є оцінка їх впливу на систему в цілому. Методології оцінювання включають в себе елементи теорії ігор, складних систем, емерджентності, обчислювальної соціології, багатоагентної системи та еволюційного програмування. З теоретичних засад агентного моделювання можна відзначити теорію складності, складні системи (і складні адаптивні системи), штучне життя (та розподілений штучний інтелект), об'єктно-орієнтоване програмування, клітинні автомати, теорію графів та теорію категорій. В даний час не встановлено єдиного визначення для агента. Але нижче наведені деякі сталі з них:

- Агент - це програмний або апаратний об'єкт, який функціонує автономно для досягнення мети, поставленої користувачем;

- Агенти - це програмні об'єкти, які мають здатність сприймати вплив із середовища, визначати реакції на цей вплив і відповідно формувати поведінку. Такі агенти можуть взаємодіяти один з одним в мережі, "міркувати" і обмінюватися даними для формування індивідуальних або колективних рішень;

- Агент - це програмний об'єкт, який виконує певні профілактичні та коригувальні дії відповідно до завдань, делегованих людиною;

- Агент - знаходиться в деякому середовищі і розпізнає її за допомогою датчиків, отримує дані, що відображають події, що відбуваються в середовищі, інтерпретує ці дані і використовує їх в якості ефектора;

Перевагами агентного моделювання є можливість адаптації агентів до системних змін безпосередньо в процесі моделювання; можливість спостерігати за кожним окремим агентом незалежно один від одного. Агентне моделювання як правило застосовують для в масштабах окремого процесу (виробництво, обслуговування, тощо).

Основною метою економіки є забезпечення суспільства споживчими товарами та послугами, які створюють умови для життя та безпеки окремих осіб, сімей, громад та країни. У цьому контексті є сенс розглядати, вивчати та моделювати економічні системи. Практичними завданнями моделювання є:

- аналіз економічних об'єктів і процесів;

- економічне прогнозування, передбачення розвитку економічних процесів;

- розробка управлінських рішень на всіх рівнях господарської ієрархії управління.

Однак при побудові моделей виникає ряд труднощів, пов'язаних з динамічністю економічних процесів, що проявляється у зміні параметрів, а іноді і структури системи. Основною вимогою до моделі є відповідність модельованого процесу реальному світу. Динамізм не завжди адекватно відтворюється в математичній формі (в моделях), оскільки важко визначити найосновніші властивості об'єкта управління. Більше того, одні й ті ж властивості системи можуть бути важливими в один момент часу і неважливими в інший. На поведінку економічної системи сильно впливають суб'єктивні фактори, а також зовнішні

## Інформаційні технології

умови. Ці зв'язки та взаємодії називаються немодельованими граничними умовами або перехідними станами.

Таким чином, властивостями безперервності і динамічності володіють як самі об'єкти моделювання, так і умови функціонування модельованого об'єкта. Ці умови за прогнозований період можуть змінитися, тому відповідно, і поведінка об'єкта буде відрізнятися від передбаченого моделлю (інтерпретаційний аспект).

Наступною проблемою є значення інформації, а саме: наповнення розроблених моделей конкретно і якісною інформацією. Точність і повнота первинної інформації, реальні можливості її збору і обробки багато в чому визначають вибір типів моделей, які можуть отримати практичне застосування. Вона може бути розділена на дві категорії: інформація про минулий розвиток і сучасний стан об'єктів (фінансові спостереження та їх обробка) та інформація про майбутній розвиток об'єктів, що включає дані про очікувані зміни їх внутрішніх параметрів і зовнішніх умов (прогнози). Друга категорія інформації є результатом самостійних досліджень, які можуть виконуватись шляхом моделювання.

Тож, для початку роботи необхідно визначитись з основними необхідними вхідними даними, функціональними одиницями та залежностями між ними. Джерелом для всіх даних обрана державної служби статистики. Так візьмемо в якості головного показника валовий регіональний (національний) продукт, що буде визначатися функцією зростання. Зовнішньою рушійною силою є рівень інвестицій, що впливає на регіональну промисловість.

Зовнішній вплив включає в себе інші чинники що не можуть бути передбачені при моделюванні (такі як ризики пов'язані зі збитками від воєнних дій) тож його внесення робить модель стохастичною. Це дозволить знайти єдині правила для стійкого розвитку для різних ступенів впливу зовнішніх збитків. Причинно наслідкова діаграма економіки представлена на рис. 1.

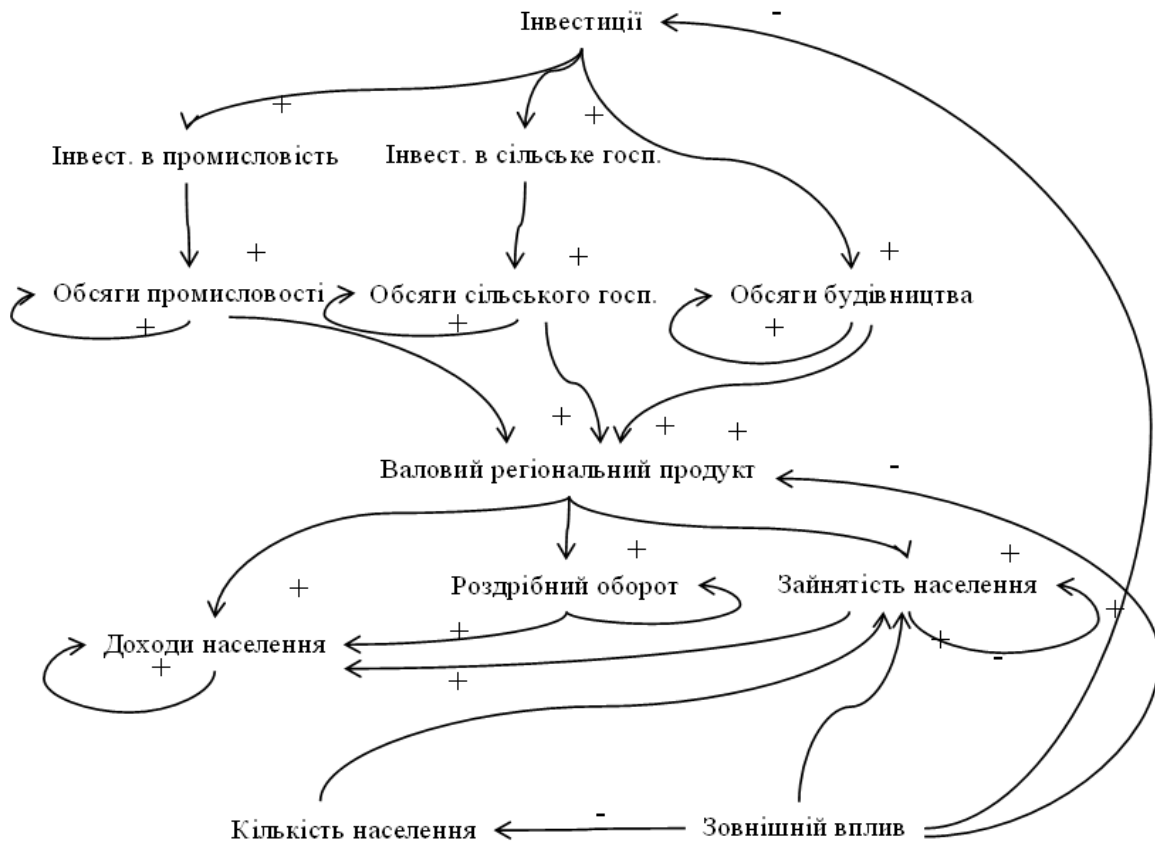


Рисунок 1 – Причинно наслідкова діаграма економічних процесів

Для подальшого моделювання було перенесено зібрані дані на існуючу перевірену модель Солоу. Основне завдання цієї моделі формулюється "золотим правилом". Згідно з цим правилом, оптимальний рівень пропозиції капіталу є таким, що гарантує найвищий рівень споживання. Щоб досягти цього рівня, необхідно збільшити інвестиції і таким чином зменшити споживання поточного покоління. Модель має кілька обмежень: По-перше, вона передбачає закриту економіку, що можливо прийняти як необхідне спрощення для побудови моделі.

По-друге, обмеженням моделі є те, що частка доходу, яка припадає на капітал (виведена з оцінок моделі), не збігається з даними національних рахунків. Одна зі спроб вирішити цю проблему полягає в тому, щоб розширити поняття капіталу, включивши до нього фізичний і людський капітал (останній включає освіту і, в деяких випадках, здоров'я).

По-третє, оцінена швидкість збіжності моделі є низькою. З використанням статистичних даних (табл. 1), адаптовані коефіцієнти еластичності виробництва за працею  $\alpha_1 = 0,353$  та еластичності виробництва за капіталом  $\alpha_2 = 0,647$ .

Таблиця 1 – Статистичні коефіцієнти для моделі по роках

рік	К - ВВП грн, млн.	L- кількість зайнятих, млн.	F основні фонди, млн. грн.
2019	3 977 198	16 578	4 301 474 677
2020	4 222 026	15 915	4 594 827 319
2021	5 450 849	15 610	4 891 300 904

При моделюванні в системі AnyLogic, за допомогою інструментів бібліотеки системної динаміки розроблено системно-динамічну діаграму, що описує модель Солоу (рис. 2).

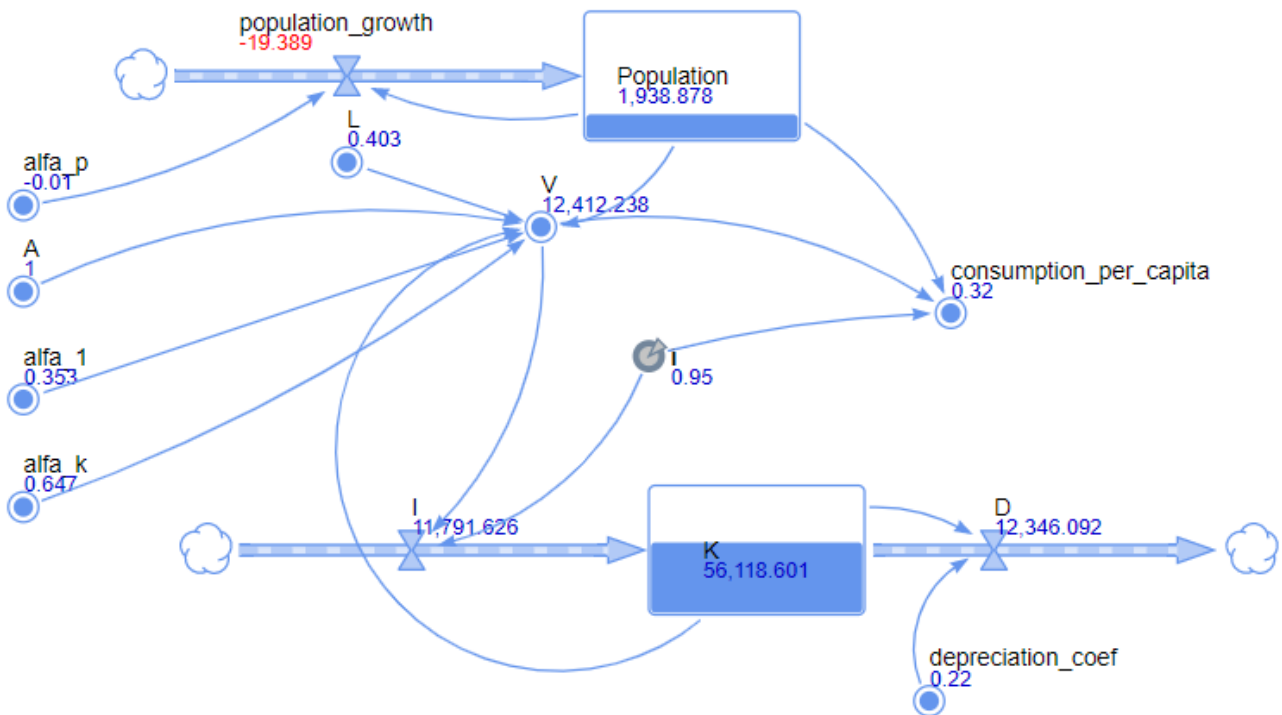


Рисунок 2 – Діаграма процесів моделі Солоу у середовищі AnyLogic



## Інформаційні технології

В результаті проведення імітаційного експерименту, діаграма процесів змінює показники накопичення, за якими можна проаналізувати її поведінку та побудувати відповідні графіки, наприклад, зміну споживання на душу населення (рис. 3).

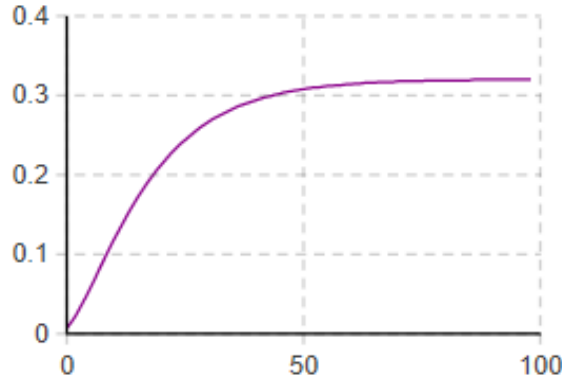


Рисунок 3 – Графік зміни споживання на душу населення з часом

За графіком на рис. 3 можна бачити, що споживання на душу населення має виражене S-подібне зростання, та досягає максимуму при значенні 0,32.

Рівноважне економічне зростання сумісне з різними значеннями норми заощаджень, що піднімає проблему оптимального вибору цієї норми. Якщо запас капіталу достатньо великий, то високий рівень виробництва гарантовано, але значна його частина буде використана на накопичення, а не на споживання, і суспільство не зможе скористатися плодами зростання. Якщо запас капіталу занадто малий, майже все вироблене буде споживатися, але й показники виробництва значно зменшуються. Зрозуміло, що десь між цими двома крайнощами знаходиться оптимальна точка для суспільства.

Проведемо імітаційний експеримент з варіюванням параметрів моделі Солоу та знайдемо таке значення частки валових інвестицій у ВВП ( $i$ ), щоб максимізувати споживання на душу населення. Варіюючи параметром ВВП проведено 161 ітерація комп'ютерного експерименту (рис. 4).

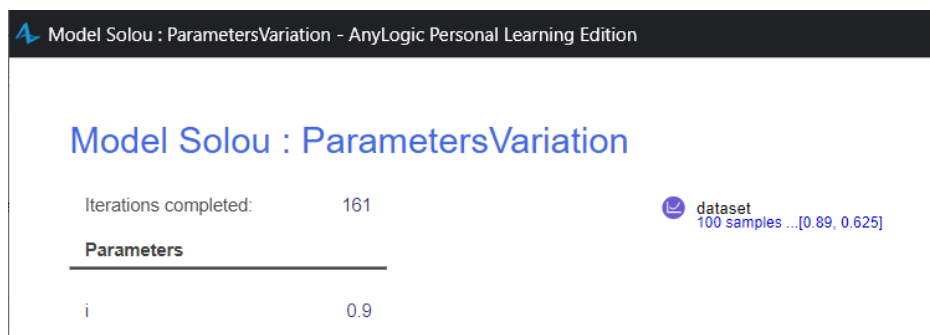


Рисунок 4 – Інтерфейс та дані імітаційного експерименту варіювання параметрів в середовищі AnyLogic

За результатами експерименту сформовані датасети та відповідні графіки (рис. 5). Можна спостерігати, що при нормі накопичення 0,65 досягається максимально можливе значення споживання на душу населення 1,12.

## Інформаційні технології

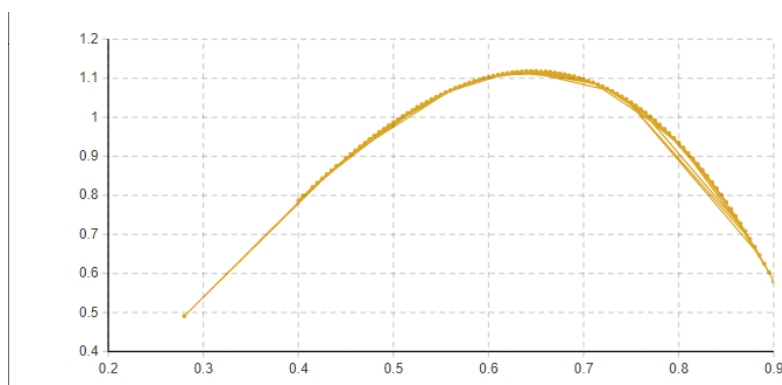


Рисунок 5 – Графік споживання на душу населення в залежності від значення ВВП

Отримані дані для реальної економіки, показують, що запаси капіталу є набагато нижчими від рівня «золотого правила». Для досягнення цього рівня вимагається збільшення інвестицій і, відповідно, зниження рівня споживання нинішніх поколінь. Оптимальний чисельний показник норми накопичення є бажаним але на практиці недосяжним для жодної економіки світу через певну спрощеність моделі.

## ВИСНОВКИ

Спираючись на проведений аналіз, можна зробити висновок, що моделювання є важливим компонентом процесу управління. Тому досить актуальним стає вивчення і всебічний аналіз моделювання при вирішенні економічних задач.

Отже, при розробці моделей економічних процесів необхідно приймати до уваги:

- мінливість (динамічність) економічних процесів;
- вплив навколишнього середовища на досліджуваний об'єкт;
- контроль за точністю і повнотою первинної інформації;
- однаковий ступінь агрегування вихідних даних;
- однорідну структуру одиниць сукупності;
- аналогію методів розрахунку показників у часі;
- однакову періодичність обліку окремих змінних;

Використання прикладних середовищ моделювання, таких як AnyLogic, якісно полегшує проведення моделювання та експериментів. За результатами моделювання досліджено характер динаміки споживання на душу населення а також проведено експеримент з визначення оптимальної норми накопичення користуючись «золотим правилом».

Результати економічного та математичного моделювання часто не є одразу доступними для прийняття управлінських рішень, а розглядаються як своєрідний консультативний інструмент.

Вони розглядаються як інструменти. Формальні методи є насамперед засобом підготовки науково обгрунтованого матеріалу для подальшої раціональної поведінки менеджерів у процесі управління. Вони дозволяють ефективно використовувати досвід, людську інтуїцію та здатність вирішувати проблеми, які важко піддаються формалізації.

### Список використаних джерел

1. Кравченко, Т. В. Методи прогнозування регіонального економічного розвитку / Т. В. Кравченко // Економічний аналіз : зб. наук. праць / Тернопільський національний економічний університет; редкол.: С. І. Шкарабан (голов. ред.) та ін. – Тернопіль: Видавничополіграфічний

центр Тернопільського національного економічного університету “Економічна думка”, 2013. – Том 13. – С. 88-94. – ISSN 1993-0259.

2. *Важинський, Ф. А.* Основні методи прогнозування соціально-економічного розвитку регіону / *Ф. А. Важинський, І. Ф. Коломієць* // Науковий вісник: зб. наук.-техн. пр. - Львів: Український державний лісотехнічний університет. – 2004. – Вип. 14.7. – С. 166-170.

3. *Фісун, К. А.* Методологія програмування розвитку регіонів України: монографія / *К. А. Фісун*. – Харків, 2007. – 401 с.

4. *Сауренко, Т. Н., Анисимов, В. Г.* Математические модели прогнозирования экологической угрозы техногенных аварий и катастроф в составе интегрированных систем безопасности региона. / *Т. Н. Сауренко, В. Г. Анисимов* // *Civil SecurityTechnology*. – 2019. – Т. 16, №. 3 (61). – С. 62–67.

5. *Рамазанов С.К.* Моделювання соціально-еколого-економічної динаміки в нестабільному середовищі / *С.К. Рамазанов* // Інформатика та системні науки (ІСН-2015): матеріали VI Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю, (м. Полтава, 19–21 берез. 2015 р.). – Полтава: ПУЕТ, 2015.

6. Моделі економічної динаміки для фахівців з інформаційних технологій: Навчальний посібник / *О. М. Гладка, І. М. Карпович, А. М. Сінчук*. – Рівне: РДГУ, 2019. – 158 с.

**Ostapenko A. O., Zalevska D. O**

### STUDY OF COMPLEX SYSTEMS USING SIMULATION MODELING BASED ON SYSTEM DYNAMICS

*The paper analyzes the methods and approaches of simulation modeling, considers their capabilities, advantages, disadvantages and areas of application. Two key approaches to simulation modeling are identified and described, namely system dynamics and agent-based modeling. Their essence and areas of application, the feasibility of using them for applied problems are revealed. Attention is drawn to the possibilities of combining these methods, as well as the use of a combined approach in the context of an applied modeling environment, in particular within the framework of the AnyLogic platform. This approach allows us to consider the behavior of a system consisting of subsystems. The interaction of system dynamics and agent-based modeling is analyzed in detail, and the possibilities of optimizing and improving modeling processes are identified. The simulation modeling of applied problems in the economic field, the peculiarities of creating economic models and their transition to mathematical and economic structures are considered. The key problems that arise in the modeling of economic systems are identified and clear rules for their elimination are formulated, which help to improve the accuracy and adequacy of models. The paper provides a specific example of modeling the economic system of Ukraine based on statistical data for the period of 2019-2022. The mathematical model of Solow is used, and its coefficients are derived on the basis of official data. Spatial system-dynamic diagrams of processes in the state economy are built, dynamic simulation models are developed using the AnyLogic platform. A formal description of the economic growth model is made, including a detailed description of the relationships in the model. An experiment was conducted to determine the optimal rate of accumulation, taking into account the concept of the "golden rule". The results of the experiment are important for understanding and improving economic strategies.*

**Keywords:** *simulation modeling, system dynamics, agent modeling, Solow model, golden rule concept, economic-mathematical model, AnyLogic environment, computer experiment.*

*Стаття надійшла 20.03.2024 р.*