

О. Г. ЗІНОВ'ЄВА

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного  
ORCID: 0000-0003-3760-8952

Г. В. ГЕШЕВА

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного  
ORCID: 0000-0003-3052-4393

## ОГЛЯД ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДУЛЮВАННЯ

В роботі дається огляд сучасних програмних засобів імітаційного моделювання та їх можливостей стосовно дослідження механізмів функціонування та управління виробничими системами. Представлено важливість імітаційного моделювання при проектуванні складних систем.

Одним із найперспективніших напрямів планування та управління виробництвом є імітаційне моделювання (ІМ), яке дає змогу отримати якісні та кількісні оцінки можливих наслідків прийнятих рішень. Імітаційне моделювання може забезпечити вирішення різноманітних завдань дослідження: – визначення реального алгоритму роботи конкретної системи з урахуванням імовірнісних характеристик окремих елементів і сигналів; – розрахунок статистичних характеристик (середнє, максимальне та мінімальне значення, коефіцієнт використання); – оптимізація структури або параметрів досліджуваної системи; – пошук збоїв і збоїв у реальній системі та їх причин; – створення комп'ютерних ділових ігор як компонентів систем підтримки прийняття рішень.

Метою імітаційного моделювання є відтворення поведінки досліджуваної системи за результатами аналізу найбільш істотних зв'язків між її елементами.

Будь-яка імітаційна модель – це програма або комп'ютерна установка, яка описує структуру і поведінку реальної системи в часі за допомогою інформаційних технологій. Такі моделі допомагають отримати статистику про функціонування системи на основі вхідних даних, отриманих системою. Ці моделі можуть бути створені за допомогою програмного забезпечення, систем комп'ютерного моделювання. У даній роботі ми розглядаємо імітаційне моделювання на прикладі дискретно-подієвого моделювання.

В роботі наведено результати дослідження ринку прикладних програм імітаційного моделювання з точки зору можливості та доцільності використання останніх при оптимізації технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Досліджено основні етапи розвитку програм імітаційного моделювання та особливості модифікування прикладних програм на даних етапах. Розглядаються різні програми імітаційного моделювання, які доцільно застосовувати при проектуванні та оптимізації агропромислових комплексів.

**Ключові слова:** імітаційне моделювання, система, проектування, алгоритм, засоби.

O. G. ZINOVIEVA

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University  
ORCID: 0000-0003-3760-8952

H. V. HESHEVA

Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University  
ORCID: 0000-0003-3052-4393

## OVERVIEW OF SIMULATION MODULATION SOFTWARE

The work provides an overview of modern simulation software tools and their capabilities in relation to researching the mechanisms of functioning and management of production systems. The importance of simulation modeling in the design of complex systems is presented.

One of the most promising areas of production planning and management is simulation modeling (IM), which allows obtaining qualitative and quantitative estimates of the possible consequences of decisions made. Simulation modeling can provide a solution to a variety of research tasks: – determination of a real algorithm for the operation of a specific system, taking into account the probabilistic characteristics of individual elements and signals; – calculation of statistical characteristics (average, maximum and minimum values, utilization ratio); – optimization of the structure or parameters of the studied system; – searching for failures and malfunctions in the real system and their causes; – creation of computer business games as components of decision support systems.

The purpose of simulation modeling is to reproduce the behavior of the studied system based on the results of the analysis of the most significant connections between its elements.

Any simulation model is a program or computer installation that describes the structure and behavior of a real system in time with the help of information technologies. Such models help to obtain statistics about the functioning of the system based on the input data received by the system. These models can be created using software, computer simulation systems. In this work, we consider simulation modeling on the example of discrete-event modeling.

*The paper presents the results of the market research of applied simulation modeling programs from the point of view of the possibility and expediency of using the latter in optimizing the maintenance of agricultural machinery. The main stages of the development of simulation programs and the peculiarities of modifying application programs at these stages are studied. Various simulation programs are considered, which are expedient to use in the design and optimization of agro-industrial complexes.*

**Key words:** simulation modeling, system, design, algorithm, tools.

### Постановка проблеми

Імітаційне моделювання – метод дослідження, при якому система, що вивчається, замінюється моделлю з достатньою точністю, яка описує реальну систему, з якої проводяться експерименти з метою отримання інформації про цю систему. Імітаційне моделювання системи передбачає, що процес функціонування системи відтворюється за допомогою алгоритму, який реалізується за допомогою комп'ютера. Імітаційне моделювання застосовується, коли неможливо побудувати аналітичну модель системи. Таку модель можна «програти» в часі, як для одного випробування, так і заданої їх множини. При цьому результати будуть визначатися випадковим характером процесів. За цими даними можна отримати достатньо стійку статистику. Експериментування з моделлю називають імітацією (імітація – це збагнення суті явища, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті).

Актуальність цієї теми складається в тому, що імітаційне моделювання на комп'ютері – це один із найпотужніших засобів дослідження, зокрема, складних динамічних систем. Як і будь-яке комп'ютерне моделювання, воно дає можливість проводити обчислювальні експерименти з системами, які ще проєктуються, і вивчати системи, натурні експерименти з якими, через міркування безпеки або дорожнечі, не доцільні. У той же час, завдяки своїй близькості до фізичного моделювання, це метод дослідження доступний більш широкому колу користувачів [1].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні 15–20 років імітаційне моделювання стало одним із найпоширеніших інструментів дослідження складних систем та процесів. Нині ринку програмного забезпечення для імітації пропонується понад 50 потужних програмних засобів імітаційного моделювання [2]. Усього ж ринку інформаційних технологій фігурує близько 150 програмних продуктів, дозволяють проводити імітаційні експерименти [2, 3]. Діапазон та різноманітність такого програмного забезпечення продовжують зростати, відбиваючи тенденцію сталого попиту на нього.

### Постановка завдання

Мета даного дослідження – розглянути різні методи, що використовуються для імітаційного моделювання, виділити галузі застосування таких систем, а також показати нові шляхи та тенденції їх розвитку

### Виклад матеріалу дослідження

Імітаційна модель – логіко-математичний опис об'єкта, який може бути використаний для експериментування на комп'ютері з метою проєктування, аналізу та оцінки функціонування об'єкта.

До імітаційного моделювання вдаються у випадках, коли:

- дорого чи неможливо експериментувати на реальному об'єкті;
- неможливо побудувати аналітичну модель: у системі є час, причинні зв'язки, наслідки, нелінійності, стохастичні (випадкові) змінні;
- необхідно зімітувати поведінку системи у часі.

Мета імітаційного моделювання полягає у відтворенні поведінки досліджуваної системи на основі результатів аналізу найістотніших взаємозв'язків між її елементами або іншими словами – розробці симулятора (англ. simulation modeling) досліджуваної предметної галузі для проведення різних експериментів.

Імітаційне моделювання дозволяє імітувати поведінку системи у часі. Причому плюсом є те, що часом у моделі можна керувати: уповільнювати у разі швидкоплинних процесів і прискорювати для моделювання систем з повільною мінливістю. Можна імітувати поведінку тих об'єктів, реальні експерименти з якими дорогі, неможливі чи небезпечні.

Області застосування імітаційного моделювання:

- бізнес процеси;
- бойові дії;
- динаміка населення;
- дорожній рух;
- IT-інфраструктура;
- математичне моделювання історичних процесів;
- логістика;
- пішохідна динаміка;
- виробництво;
- ринок та конкуренція;
- сервісні центри;

- ланцюжки поставок;
- вуличний рух;
- управління проектами;
- економіка охорони здоров'я;
- екосистеми.

Особливістю вирішення завдань планування та управління виробництвом є необхідність обліку при їх вирішенні безлічі змінних величин, що характеризують ринкові умови, що постійно змінюються. Один із найперспективніших напрямів розв'язуваних завдань – імітаційне моделювання, що дозволяє отримати якісні та кількісні оцінки можливих наслідків керованих рішень. У роботах багатьох авторів зазначається, що імітаційні методи – найпоширеніші засоби теорії управління та дослідження операцій в управлінні промисловими підприємствами та організаціями. Це пояснюється тим, що вони дають інструментальну підтримку аналізу функціонування з метою вдосконалення виробничих та управлінських процесів, скоординованої та контролюваної роботи всіх підсистем.

Історія розвитку імітаційного моделювання визначила кілька поколінь програмних засобів, еволюція яких може бути подана у вигляді послідовної зміни шести поколінь [3, 4]:

1. Перше покоління (1950-ті рр.) – Програмування моделей мовами високого рівня без будь-якої спеціальної підтримки. Програми для завдань моделювання розроблялися на основі універсальних мов, таких як FORTRAN та ALGOL.

2. Друге покоління (1960-ті рр.) – спеціальна підтримка моделювання у вигляді відповідних виразів мови, генераторів випадкових чисел, засобів представлення результатів.

1960–1965 р.р. – з'явилися перші мови моделювання: GPSS (мова транзактів), SIMULA (мова процесів), SIMSCRIPT (мова подій), CSL (мова робіт), SOL, GASP, SLA;

1965–1970 гг. – створено друге покоління мов моделювання: GPSS V, SIMSCRIPT II.5, SIMULA 67, GASP-IV.

3. Третє покоління (1970-ті рр., CADSIM, DEMOS, ACSL, MODEL-6, GEAR...) – можливість комбінованого безперервно-дискретного моделювання. Розвиток вже розроблених мов та засобів моделювання, орієнтований на підвищення ефективності процесів моделювання та перетворення моделювання на більш простий та швидкий метод дослідження складних систем. Системи автоматизації моделювання, розроблені у 1960–1970-ті роки. (Simula, SLAM), були ще надто складні для широкого кола користувачів, насамперед через складність текстової форми опису моделі та відсутність програмних реалізацій ефективних чисельних методів.

4. Четверте покоління (1980-ті рр., SLAM II PC System Animation, PC Model SIMFACTORY, GPSS PC, XCELL) – орієнтація на конкретні області застосування, можливість анімації. Розробка імітаційних систем, що містять інтерфейс непрограмуючого користувача, вхідні та вихідні аналізатори, можливість анімації процесу імітаційного моделювання. Перенесення програмного забезпечення для імітаційного моделювання на персональні ЕОМ з використанням засобів графічного інтерфейсу (для візуалізації та анімації процесів моделювання).

5. П'яте покоління (1990-і рр., SIMPLEX II, SIMPLEX++) – графічний інтерфейс, інтегроване середовище для створення та редагування моделей, планування експериментів, управління моделюванням та аналізу результатів. Розробка засобів технологічної підтримки процесів розподіленого імітаційного моделювання на мультипроцесорних ЕОМ та мережах.

6. Шосте покоління (кінець 1990-х – наш час, Arena, AutoMod, Anylogic) – інтегровані системи імітаційного моделювання, у яких розвиваються найважливіші особливості засобів п'ятого покоління.

Програмні засоби імітаційного моделювання, які використовуються для розробки імітаційних моделей виробничих систем, можна розділити на чотири групи [5]:

1. Програмування комп'ютерної моделі за допомогою універсальних мов (наприклад C++, Delphi, Pascal). Динаміку системи описують рівняннями, які кодують у програму, потім проводять розрахунок рівнянь та встановлюють зв'язок вихідних величин із вхідними.

2. Програмування комп'ютерної моделі із застосуванням спеціалізованих мов моделювання (наприклад, GPSS, AnyLogic), написаних універсальними мовами. Динаміка системи відображається взаємодією елементів моделі у часі та просторі. Спеціалізовані мови імітаційного моделювання компактні та мають широке коло додатків, проте потребують спеціальної підготовки користувача, який має написати програму в термінах мови для конкретного об'єкта моделювання.

3. Побудова комп'ютерних моделей та проведення імітаційних експериментів за допомогою спеціалізованих комп'ютерних середовищ (наприклад, Arena, AnyLogic, GPSS World, VisSim).

Імітаційні середовища не вимагають програмування у вигляді послідовності команд. Замість написання програми користувачі складають модель із бібліотечних графічних модулів та/або заповнюють спеціальні форми. Як правило, імітаційне середовище забезпечує можливість візуалізації процесу імітації, дозволяє проводити сценарний аналіз та пошук оптимальних рішень.

4. Включення засобів імітаційного моделювання у стандартні математичні комп'ютерні системи (наприклад, пакет Simulink системи Matlab, Mathcad, Maple). Це програмні середовища, призначені для виконання різноманітних

математичних і технічних розрахунків, що надають користувачеві інструменти для роботи з формулами, числами, графіками, текстом, включають засоби для управління змінними, введенням і виведенням даних, а також забезпечені графічним інтерфейсом.

Модель являє собою спрощене відображення реальності – це менш детальне, менш складне, менш докладне відтворення реально існуючого об'єкта, системи або феномена, процесу.

Існує цілий ряд популярних систем імітаційного моделювання різного класу – від простих програм, призначених для установки на персональному комп'ютері, до потужних систем, що включають бібліотеки більшості наявних на ринку комунікаційних пристроїв і дозволяють в значній мірі автоматизувати дослідження мережі, яка вивчається.

Для імітаційного моделювання використовується величезна кількість програмних продуктів, таких як: Aimsun (Розробник: компанія TSS – Transport Simulation Systems, S.L, Іспанія), AnyLogic (Розробник: The AnyLogic Company (XJ Technologies), Arena (Розробник: Rockwell Automation Inc., Wexford, PA, США.), AutoMod (Розробник: Brooks Automation, США), AweSim (Розробник: Symix Systems Inc., США).

Але нами більш детально буде розглянута одна з найбільш поширених і доступніших програм, що використовується при дискретно-подієвому моделюванні, – GPSS.

GPSS (General Purpose Simulation System) – система моделювання складних об'єктів загального призначення. Спочатку розроблювалась і підтримувалась компанією IBM. Наразі існують версії різних розробників, найсучасніша з яких – GPSS World – версія GPSS для персональних EOM та ОС Windows, що розроблена компанією Minuteman Software.

GPSS World є об'єктно-орієнтованою мовою. Можливості візуального представлення інформації мови GPSS World дозволяють спостерігати та фіксувати внутрішні механізми функціонування моделей. Інтерактивність мови GPSS World дозволяє одночасно досліджувати та управляти процесами моделювання.

Практичним прикладом застосування імітаційного моделювання може бути модель служби технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. Майстерня технічного обслуговування сільськогосподарської техніки характеризується як система масового обслуговування з обмеженою кількістю постів  $n$ , в якій забезпечується технічне обслуговування сільськогосподарської техніки. Цю модель можна представити як багатоканальну систему з очікуванням, де від комбайнів або тракторів надходить потік замовлень на обслуговування. Служба технічного обслуговування сільськогосподарської техніки включає в себе  $n$  постів обслуговування. Кожен пост може обслуговувати по одній машині або виконувати один запит на обслуговування. Кожен запит, що надходить на обслуговування, включається в чергу, оскільки групи обслуговування зайняті попереднім запитом, і чекає, поки один із постів завершить роботу. Якщо запит надходить і є вільний пост, то запит негайно підключається до вільного посту і машина отримує технічне обслуговування.

Основними параметрами, що характеризують діяльність майстерні технічного обслуговування, є: ймовірність того, що всі посади будуть вільні або зайняті; математичне очікування довжини черги; коефіцієнти, що відображають зайнятість та стан простою постів технічного обслуговування.

Нижче наведений код програми в пакеті GPSS (рис. 1).

```

GPSS World - [Untitled Model 2]
File Edit Search View Command Window Help
In EQU 0.78 ;інтенсивність надходження техніки на обслуговування
Ar EQU 2.64 ;середній час обслуговування
Post STORAGE 5 ;кількість постів обслуговування
Tr QTABLE Qr,10,10,20 ;час очікування обслуговування
*****
GENERATE ,,,20 ;20 одиниць техніки надходить на обслуговування
ADV ADVANCE (Експонентіал(1,0,1/In))
QUEUE Qr=
ENTER Post
DEPART Qr=
ADVANCE (Експонентіал(1,0,Ar)) ;обслуговування техніки
LEAVE Post
TRANSFER ,ADV
GENERATE 160
SAVEVALUE Lch QrSq ;середня довжина черги
SAVEVALUE Tch QrTq ;середній час техніки в черзі
SAVEVALUE Tp (QrTq+Ar) ;середній час простою техніки
TERMINATE 1

```

Рис. 1. Код програми в пакеті GPSS

GPSS World - (Untitled Model 2.18.1 - REPORT)

File Edit Search View Command Window Help

| QUEUE | MAX | CONT. | ENTRY | ENTRY(0) | AVE. CONT. | AVE. TIME | AVE. (-0) | RETRY |
|-------|-----|-------|-------|----------|------------|-----------|-----------|-------|
| QR    | 15  | 13    | 301   | 5        | 12.559     | 6.676     | 6.789     | 0     |

| STORAGE | CAP. | REM. | MIN. | MAX. | ENTRIES | AVL. | AVE. C. | UTIL. | RETRY | DELAY |
|---------|------|------|------|------|---------|------|---------|-------|-------|-------|
| BOST    | 5    | 0    | 0    | 5    | 288     | 1    | 4.997   | 0.999 | 0     | 13    |

| TABLE | MEAN  | STD. DEV. | RANGE    | RETRY  | FREQUENCY | CUM. % |
|-------|-------|-----------|----------|--------|-----------|--------|
| TR    | 6.668 | 2.421     | -        | 0      | 265       | 92.01  |
|       |       |           | 10,000 - | 20,000 | 23        | 100.00 |

| SAVEVALUE | RETRY | VALUE  |
|-----------|-------|--------|
| LCH       | 0     | 12.559 |
| TCH       | 0     | 6.676  |
| TF        | 0     | 9.316  |

| SEC | MIN | FRI | EDT     | ASSEM | CURRENT | NEXT | PARAMETER | VALUE |
|-----|-----|-----|---------|-------|---------|------|-----------|-------|
| 15  | 0   |     | 160.020 | 15    | 2       | 3    |           |       |
| 8   | 0   |     | 160.268 | 8     | 2       | 3    |           |       |
| 9   | 0   |     | 160.802 | 9     | 6       | 7    |           |       |
| 5   | 0   |     | 161.325 | 5     | 6       | 7    |           |       |
| 12  | 0   |     | 162.245 | 12    | 6       | 7    |           |       |
| 14  | 0   |     | 163.791 | 14    | 6       | 7    |           |       |
| 13  | 0   |     | 164.178 | 13    | 6       | 7    |           |       |
| 22  | 0   |     | 320.000 | 22    | 0       | 9    |           |       |

For Help, press F1 Report is Complete. Clock

Рис. 2. Результати, отримані при моделюванні роботи машинно-тракторної станції

На основі отриманих результатів проводять оптимізацію роботи майстерні.

В даному випадку можна побачити, що при п'яти постах обслуговування 20 одиниць техніки протягом місяця коефіцієнт завантаження майстерні складає 99,9%, час простою техніки – 9,3 год. Тому для оптимізації роботи машинно-тракторної майстерні і зменшення часу простою слід додати ще пости обслуговування

Система GPSS добре підходить для моделювання процесів масового обслуговування. Однак ця система має кілька недоліків: перший із них полягає в тому, що GPSS дозволяє моделювати лише один пристрій. Якщо в моделі є два або більше паралельно працюючих об'єктів, то таку модель необхідно моделювати за допомогою кількох паралельно працюючих пристроїв. Іншим недоліком є відсутність графічних даних, що позбавляє можливості візуального представлення моделі в реальності, а також ускладнює процес обробки інформації. Крім того, в цій програмі дуже складно представити процеси обробки інформації у вигляді алгоритму.

#### Висновки

На основі проведеного дослідження обґрунтована доцільність застосування імітаційного моделювання в прикладних пакетах при моделюванні агропромислових комплексів.

Інші методи, такі як математичні, фізичні та інші, є мало застосовуваними для моделювання складних систем, до яких можна віднести сільськогосподарські підприємства. Причинами цього є складність реалізації даних методів та коштовність.

Сформульовані основні вимоги до прикладних пакетів і критерії їх вибору при проведенні імітаційного моделювання.

#### Список використаної літератури

1. Томашевський В.М. Моделювання систем. К.: Видавнича група ВНУ, 2005. 352 с.
2. Ситник В. Ф., Орленко Н.С. Імітаційне моделювання: навч. посіб. Київ : КНЕУ, 1998. 232 с.
3. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. 847 с.
4. Братушка С.М. Імітаційне моделювання як інструмент дослідження складних економічних систем. Вісник Української академії банківської справи, 2009. № 2(27), С. 113–118.
5. Жерновий Ю.В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування: практикум. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2007. 307 с
6. Томашевський В.Н., Жданова О.Г., Жолдаков О.О. Вирішення практичних завдань методами комп'ютерного моделювання: Навч. посібник. К.: «Корнійчук», 2001. 268 с.
7. Лубко Д.В., Шаров С.В., Зінов'єва О.Г. Проектування імітаційної моделі роботи технологічної лінії прибирання гною на тваринницькій молочній фермі. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2022. Том 33(72) № 3. С. 56-60.
8. Соколовський Я. І., Шабатура Ю.В., Виклюк Я.І. та ін. Моделювання систем в середовищі GPSS World: навч. посіб. Львів : Новий Світ, 2020. 288 с.

9. Шамрін Р. В. Імітаційне моделювання економічних систем: програмні засоби та напрями їх вдосконалення. Економіка та держава, 2016. № 1. С. 35–39.

10. Боев, В. Д. Концептуальне проектування систем в AnyLogic і GPSS World. 2014. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/4818/1066/info>

#### References

1. Tomashevskiy, V.M. (2005), *Modeling of systems*. Kyiv: BHV
2. Sytnyk, V. F. & Orlenko, N.S. (1998) *Simulation modeling: Tutorial*. Kyiv: KNEU
3. Kelton, V. & Lou, A. (2004) *Simulation modeling*. Kyiv: BHV
4. Bratushka, S.M. (2009). Simulation modeling as a tool for the study of complex economic systems. *Bulletin of the Ukrainian Academy of Banking*, 2(27), 113-118.
5. Zhernovyi, Yu.V. (2007), *Simulation modeling of mass service systems: workshop*. Lviv : LNU imeni Ivana Franka
6. Tomashevskiy, V.N., Zhdanova, O.H. & Zholdakov, O.O. (2001), *Solving practical problems using computer modeling methods: Tutorial*. K.: “Korniichuk”.
7. Lubko, D.V., Sharov, S.V., & Zinovieva, O.H. (2022) Designing a simulation model of the technological line of manure cleaning on a livestock dairy farm// *Scientific notes of the Tavri National University named after V.I. Vernadskyi, Series: Technical sciences*, Vol. 33(72) No. 3.
8. Sokolovskiy, Ya. I., Shabatura, Yu.V., Vykliuk, Ya.I. & other (2020), *Modeling systems in the GPSS World environment: Tutorial*. Lviv : Novyi Svit
9. Shamrin, R. (2016), “Simulation modeling of economic systems: software tools and areas of improvement”, *Ekonomika ta derzhava*, vol. 1, 35–39.
10. Boiev, V. D. (2014), *Conceptual design of systems in AnyLogic and GPSS*. URL: <http://www.intuit.ru/studies/courses/4818/1066/info>