

Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292.
Ефективна економіка. 2025. № 3.

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2025.3.51>

УДК 334.758-047.58:330.131.7

К. М. Афанасьєв,

к. е. н., доцент кафедри менеджменту і маркетингу,

Київський національний лінгвістичний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4613-3525>

І. Г. Ганечко,

к. е. н., доцент, доцент кафедри економіки та фінансів,

Державний торговельно-економічний університет

ORCID ID: <https://orcid.org/000-0002-1918-3164>

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ФІРМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

K. Afanasyev,

PhD in Economics, Associate Professor of the

Management and Marketing Department,

Kyiv National Linguistic University

I. Hanechko,

PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor

of the Department of Economics and Business Finance,

State University of Trade and Economics

MODELING FIRM BEHAVIOR UNDER UNCERTAINTY

У статті розроблено концептуальний підхід до універсальної ймовірнісно-автоматної моделі поведінки фірми в умовах невизначеності. Сформовано основні блоки такої моделі, до яких відносяться: блок для виробництва, організаційний блок, блок з чергою, блок генерації випадкових величин. Побудовано автоматні моделі та описані таблиці для умовних функціоналів переходів перших трьох вказаних блоків. З метою перевірки універсальної моделі розроблено ймовірнісно-автоматну модель підприємства з виробництва великогабаритної тари, яка включає детальний опис автоматів моделі, вектор початкових станів моделі, матрицю алфавітів, таблицю для умовних функціоналів переходів та таблицю з результатами моделювання. Проведено імітаційне моделювання поведінки виробництва великогабаритної тари та сформульовано висновки. Перспективи майбутніх досліджень включають інтеграцію запропонованого підходу в автоматному моделюванні поведінки фірми з ІІІ-асистентами.

The article develops a conceptual approach to a universal probabilistic-automatic model of a firm's behavior under uncertainty. The main blocks of such a model are formed, which include: a production block, an organizational block, a queue block, and a random variable generation block. Automata models are constructed and tables for conditional transition functionalities of the first three specified blocks are described. In order to verify the universal model, a probabilistic-automatic model of a large-sized packaging production enterprise is developed, which includes a detailed description of the model's automata, a vector of the model's initial states, a matrix of alphabets, a table for conditional transition functionalities, and a table with modeling results.

The model incorporates several random variables that reflect real-world uncertainties in production and economic activities. The primary variables include the volume of corrugated pallet sales and raw material replenishment. Corrugated pallet sales fluctuates based on market demand, seasonal trends, and competitive influences. Raw material replenishment occurs at irregular intervals due to supplier constraints, transportation delays, and logistical inefficiencies. The

availability of raw materials is crucial for ensuring continuous production and meeting customer demand.

The proposed simulation model is highly applicable for decision-making in production and supply chain management. Key benefits include risk assessment, production capacity planning and inventory management. Risk assessment enabling firms to anticipate and mitigate supply chain disruptions. Production capacity planning allows for the optimization of manufacturing schedules and workforce allocation. Inventory management ensuring a balance between stock availability and cost efficiency. By implementing this automaton-based simulation model, companies engaged in corrugated pallet manufacturing can enhance their decision-making capabilities, improve cost efficiency, and achieve long-term sustainability in a competitive market.

Simulation modeling of the behavior of large-sized packaging production is carried out and conclusions are formulated. Prospects for future research include the integration of the proposed approach in automatic modeling of a firm's behavior with AI assistants.

Ключові слова: поведінка фірми, невизначеність, ймовірісно-автоматна модель, алгоритм побудови імітаційної моделі.

Keywords: firm behavior, uncertainty, probabilistic automaton model, simulation model construction algorithm.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Протягом останніх трьох десятиліть процес діджиталізації суттєво впливає на траєкторію та інтенсивність розвитку економіки та суспільства, охоплюючи різні країни світу, з різними темпами проникаючи в ті чи інші галузі. Розвиток та конкуренція розробників програмних систем штучного інтелекту (ШІ) заставляє бізнес використовувати ШІ-платформи та вузькоспеціалізованих ШІ-асистентів. З часом за умови появи високоефективного ШІ-асистента,

який зможе замінити менеджерів різних рівнів, компанії будуть представляти собою повністю автоматизовані системи, де ключові ролі та посади виконуватимуть роботи з вбудованими ШІ-асистентами з конкретними знаннями в певній сфері. З урахуванням вищезазначеного, виникає потреба в новому погляді на моделювання поведінки фірми в умовах невизначеності. Присвячені цьому питанню наукові дослідження описують різні підходи до побудови імітаційних моделей поведінки компаній, фокусуючись в більшості випадків на побудові теоретичного опису математичної моделі в певній вузькоспеціалізованій предметній області і лише зрідка відображають практичні аспекти використання моделі та її результатів. Актуальним є питання розробки та застосування імовірісно-автоматних моделей економічних систем для прийняття управлінських рішень в умовах цифрової трансформації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика моделювання поведінки фірми в умовах невизначеності є предметом багатьох досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців, оскільки розвиток ШІ-технологій з потенційною їх інтеграцією з автоматизованими системами управління бізнесом вимагають розробки та впровадження нових універсальних імовірнісних моделей автоматного моделювання. Питання імітаційного моделювання в економічних системах досліджували Бакаєв А. А. [1; 2], Костіна Н. І., Яровицький, Н. В. [1], Мерінова С. В., Половенко Л. П. [3]. Специфіку побудови математичних моделей, що описують різні стратегії поведінки конкурентних фірм на ринку, розглянуто в роботі Грицюк Ю. І. та Грицюк М. Ю. [4]. Питанням доцільності використання багатоагентного імітаційного моделювання та побудови імітаційних моделей поведінки споживачів присвячена стаття Жихаревич В. В., Мацюк Н. О. [5]. Даніч В. М. пропонує використовувати математичні та імітаційні (у вигляді клітинних автоматів) моделі динаміки масової поведінки для прогнозування забруднення чи регенерації природного середовища, пов'язаних з ними економічних втрат, визначення управлінських впливів через системи

державного та місцевого управління, засоби масової інформації, освітні та культурні заклади [6].

Значна частина наукових публікацій присвячена моделюванню людської поведінки з використанням імітаційних моделей, зокрема, емпіричне дослідження поведінки агента з використанням поведінкового моделювання на основі імовірнісних кінцевих автоматів викладено у спільній роботі іспанських та американських науковців [7]. Разом з тим, існує потреба в стандартизованому підході до автоматного моделювання поведінки фірми для прийняття управлінських рішень.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є формування концептуального підходу до побудови універсальної автоматної моделі поведінки фірми на прикладі виробництва як основного процесу господарської діяльності підприємства.

Виклад основного матеріалу дослідження. Першочерговим завданням у контексті цього дослідження є формалізація складових компонент універсальної ймовірнісно-автоматної моделі поведінки фірми. З нашої точки зору, класична модель поведінки фірми має включати стандартизовані блоки, які можна було б використовувати в умовному 3D просторі, комбінуючи їх відповідно до поставлених задач чи відомого опису предметної області.

Потужний інструментарій автоматного моделювання дає можливість вибудовувати динаміку різних видів потоків (матеріальних, фінансових, інформаційних та ін.), а також працювати з випадковими величинами. На нашу думку, імітаційна модель поведінки фірми буде включати в себе наступні універсальні блоки, для кожного з яких буде описана нижче автоматна модель: блок для виробництва, організаційний блок, блок з чергою, блок генерації випадкових величин. Кожний з блоків має свої входи, внутрішні стани та виходи. Спочатку розглянемо алгоритм побудови імітаційної моделі [2].

Перший етап передбачає здійснення опису реальної системи на певному рівні деталізації. Цей опис повинен включати в себе деталі

структури системи, роль її окремих компонентів в роботі всієї системи, взаємозв'язок між окремими частинами на логічних і кількісних законах потоків, які моделюються системою. На другому етапі проводиться статистичне дослідження системи, яке полягає у зборі даних про її роботу з перевіркою основних особливостей опису, крім того, перевіряються різні гіпотези, які доповнюють змістовний опис. На третьому етапі необхідно побудувати формалізовану схему, тобто зробити певні спрощуючі припущення про структуру і функціонування системи. Система описується з певними модифікаціями, які викликають окремі коригування в алгоритмі її роботи і в характеристиках, що підлягають розрахунку. Таким чином, припущення повинні спростити роботу системи, не викликаючи значних коригувань в розрахункових характеристиках. Формалізована діаграма має відображати всі основні моменти описового змісту і бути добре узгоджена з результатами статистичного дослідження. Четвертий етап – побудова моделі. Зміст даного етапу полягає в складанні математичного опису системи, яка знаходиться у взаємній однозначній згоді з формалізованою схемою. Математичний опис може бути зроблений одним з методів і базується на правилах, визначених обраним методом. П'ятий етап - це вибір алгоритму моделювання, який є основою для машинної реалізації моделі.

Шостий етап передбачає розробку алгоритму моделювання для конкретної комп'ютерної системи. Розробка комп'ютерної програми може здійснюватися як програмістами, так і за допомогою систем автоматизації. На останньому (сьомому) етапі отримують необхідні результати за допомогою машинного підрахунку. У деяких випадках окремі з перерахованих етапів можуть перекриватися.

Алгоритм моделювання, програма, а іноді і сама модель повинні включати розрахунок показників результативності системи, вміти варіювати значення параметрів системи і її структури. Програма моделювання має включати спеціальні блоки, призначені для імітації випадкових величин і випадкових процесів.

Блок для виробництва. Опишемо автоматну модель однієї з найпростіших виробничих систем [2]. Номенклатура і кількість продукції, що випускається підприємством, регламентується виробничим планом. Технологія виготовлення продукції визначається технічними завданнями. Технологія виробництва передбачає певну тривалість виготовлення кожного виробу. Таким чином, з формальної точки зору виробництво може розглядатися як один з основних вузлів економічної системи.

Розглянемо випадок, коли для виготовлення однієї одиниці продукції необхідно всього лише дві одиниці матеріалу 1-го типу і одна одиниця матеріалу 2-го типу. Тривалість виготовлення однієї одиниці продукції за наявності необхідних матеріалів – випадкова величина μ . Для зберігання матеріалів використовуються склади з кінцевими ємностями D_1 , D_2 відповідно. Зберігання матеріалів 1-го та 2-го типів є роздільним. Поповнення запасів матеріалів здійснюється постійними партіями по p_1 , одиниць для матеріалів 1-го типу та p_2 одиниць - для матеріалів 2-го типу. Проміжки часу між моментами поповнення замовлень — взаємно незалежні випадкові величини η_1 та η_2 відповідно. При надходженні матеріалів, коли вся партія, що прибула, не може розміститися на складі, надлишок на склад не приймається. Існуюча виробнича потужність дозволяє одночасно виготовляти лише один виріб. При побудові моделі намагатимемося пристосувати її для визначення середньої кількості виробів, що виготовляються за одиницю часу. Визначаємо стани автоматів системи:

$p_1(t)$, $p_2(t)$ - проміжки часу, що залишилися в момент t до моменту надходження чергової партії матеріалів відповідно 1-го і 2-го типів;

$p_3(t)$, $p_4(t)$ - наявність в момент часу t на складах матеріалів 1-го і 2-го типів;

$p_5(t)$ - проміжок часу, що залишився в момент часу до моменту закінчення виготовлення чергового виробу;

$s_1(t)$ - накопичена сумарна кількість виробів, виготовлених у проміжку $(0, t]$;

$s_2(t)$ - наближене значення середньої кількості виробів, що випускаються за одиницю часу, отримане шляхом усереднення по проміжку $(0, t]$;

$s_3(t)$ - лічильник автоматного часу.

Вихідні сигнали опишемо наступним чином:

$z_1(t)$ і $z_2(t)$ - сигнали (двійкові) про поповнення або непоповнення в наступний момент часу запасу матеріалів 1-го або 2-го типу;

$z_3(t)$ і $z_4(t)$ - сигнали (двійкові) про наявність на складах у момент часу t потрібної кількості матеріалів для виготовлення одного виробу (двох одиниць матеріалу 1-го типу та однієї одиниці 2-го типу);

$z_5(t)$ - сигнал (двійковий) про можливість виробництва в наступний момент часу $(t + 1)$ почати виготовлення чергового виробу;

$z_6(t)$ - двійковий сигнал про випуск в наступний момент часу чергового готового виробу. Вихідні сигнали автоматів індикатора збігаються зі своїми станами. Для автоматів основної частини моделі система функцій виходів буде мати вигляд та відображена в таблиці 1.

Таблиця 1. Система функцій виходів для автоматів моделі

Сигнал		Сигнал	
$z_1(t)$	$p_1(t) = 1$	$z_4(t)$	$p_4(t) \geq 1$
$z_2(t)$	$p_2(t) = 1$	$z_5(t)$	$p_5(t) \geq 1$
$z_3(t)$	$p_3(t) \geq 2$	$z_6(t)$	$p_5(t) \geq 1$

Для зручності введемо проміжні величини $r_1(t)$ і $r_2(t)$. Це двійкові величини, що отримують значення 1 лише у тому випадку, коли в момент часу t сумарна кількість матеріалів відповідного типу (наявних на складі або тих, що надійшли на виробництво) дозволяє почати виготовлення чергового виробу. Значення цих проміжних величин можна обчислити за допомогою наступних співвідношень:

$$r_1 = \max \{0, \min \{1, p_3(t) + n_1 z_1(t) - 1\}\};$$

$$r_2 = \min \{1, p_4(t) + n_2 z_2(t)\}.$$

Таблиця умовних функціоналів переходів в даному випадку буде мати наступний вигляд та відображена в таблиці 2.

Таблиця 2. Таблиця умовних функціоналів переходів блоку виробництва

P _k (k=1,2)	p _k > 1		p _k = 1	
	p _k = 1		η _k	
P ₃	min {D ₁ , p ₃ +n ₁ z ₁ -2z ₄ z ₅ r ₁ }			
P ₄	min {D ₂ , p ₄ +n ₂ z ₂ -2z ₃ z ₅ r ₂ }			
P ₅	p ₅ >1	p ₅ <=1 ∧ r ₁ r ₂ = 1	p ₅ <=1 ∧ r ₁ r ₂ = 0	
	p ₅ -1	μ	0	
S ₁	s ₁ + z ₅ (t)			
S ₂	s ₁ : max {1, s ₃ }			
S ₃	s ₃ +1			

Джерело: сформовано на основі [1; 2]

Організаційний блок. Сукупність правил, виходячи з яких встановлюється пріоритетність задач в черзі, назвемо системою пріоритетів даної черги [2]. Система пріоритетів черги є визначеною, якщо для кожних двох задач, що перебувають у черзі, вона містить певне правило, за яким у кожний момент часу вказується, яка з них повинна йти за іншою. Якщо система пріоритетів для певної черги не змінюється у процесі функціонування, вважатимемо її постійною. У деяких випадках під дією певних сигналів, що надходять від інших складових системи, пріоритетність у черзі може змінюватися. Це випадок керованої системи пріоритетів. Іноді вихідна система пріоритетів може мати імовірнісний характер: пріоритетність може змінюватися випадковим чином, залежати від значень, що приймаються деякими випадковими величинами, що не залежать від стану системи.

Розглянемо модель черги з перевагою, причому систему пріоритетів виберемо найпростішу. Припустимо, що надходження задач відбувається за трьома впорядкованими (тобто перенумерованими) каналами, при цьому задачі, що надійшли по каналу з меншим номером, користуються перевагою в черзі в порівнянні з задачами, що надійшли по каналу з великим номером. З

двох задач, що надійшли по одному і тому ж каналу, право першочерговості надається тій, яка надійшла раніше.

Таким чином, для автоматного опису черги недостатньо побудувати один автомат. У цьому випадку імітація поведінки черги здійснюватиметься групою із трьох автоматів. Нехай це будуть автомати B_1 , B_2 і B_3 і стан $b_i(t)$ ($i = 1, 2, 3$) автомата B_i означає кількість задач, що надійшли каналом з номером i у момент часу t (точніше, в момент $t + 0$) у черзі.

Надходження задач у систему по кожному з каналів імітуватимемо у вигляді вхідних сигналів $h_1(t)$, $h_2(t)$, $h_3(t)$. Алфавіти цих сигналів будуть двійковими. Надходження заявок на вибуття задач з черги регламентується вхідним сигналом $j(t)$ з алфавітом P . Представимо опис автоматів у вигляді таблиці умовних функціоналів переходів (ТУФП) в таблиці 3:

Таблиця 3. Таблиця умовних функціоналів переходів організаційного блоку

B_1	$\max\{0, b_1(t) + h_1(t) - j(t)\}$
B_2	$\max\{0, b_2(t) + h_2(t) - \max\{0, j(t) - b_1(t) - h_1(t)\}\}$
B_3	$\max\{0, b_3(t) + h_3(t) - \max\{0, j(t) - b_1(t) - h_1(t) - b_2(t) - h_2(t)\}\}$

З метою узагальнення ТУФП введемо позначення:

$$g_0 = 0; \quad g_1 = b_1(t) + h_1(t);$$

$$g_2 = g_1(t) + b_2(t) + h_2(t);$$

Тоді вказана вище ТУФП запишеться у вигляді:

$$B_k = \max\{0, b_k(t) + h_k(t) - \max\{0, j(t) - g_{k-1}(t)\}\}, \text{ де } k=1, 2, 3.$$

Такий спосіб дозволяє узагальнити схему для довільного числа каналів.

Припустимо, $g_0 = 0$;

$$g_k = g_{k-1}(t) + b_k(t) + h_k(t) \quad (k=1, \dots, n-1).$$

Отримаємо узагальнену ТУФП у вигляді:

$$B_k = \max\{0, b_k(t) + h_k(t) - \max\{0, j(t) - g_{k-1}(t)\}\}, \text{ де } k=1, \dots, n.$$

При написанні ТУФП використовувалися практично важливі при побудові імовірнісно-автоматних схем поняття - проміжні величини $g_k(t)$. Вони, як і стани автоматів, є тимчасовими характеристиками системи і завжди відносяться до цього ж моменту автоматного часу, що й «старі»

значення станів автоматів. Так само, як і останні, вони мають конкретний зміст. У даному випадку кожна з проміжних величин $g_k(t)$ означає сумарну кількість задач перших k категорій пріоритетності, які в момент часу t знаходяться в черзі або прибувають вхідними каналами.

Типовий блок з чергою. Надзвичайно поширеним на практиці є випадок, коли «довжина черги» обмежена. Наприклад, мова може йти про зберігання продукції на складах обмеженої ємності, розміщення деталей, обробка яких очікується тощо. Якщо на склад надходить така кількість продукції, яка разом з продукцією, що надійшла раніше, і за вирахуванням відпущеної складає величину, що перевищує місткість складу, то надлишок продукції не приймається або повертається постачальнику, або переадресовується в інше місце зберігання. На підставі цього можна зробити висновок, що в даному випадку поведінка черги описується автоматом з ТУФП наступного виду:

$$b(t+1) = \min \{q, \max (0, b(t) + x(t) - y(t))\},$$

де q - ємність складу, $b(t)$ - стан автомата, $x(t)$ - вхідні сигнали, $y(t)$ - вихідні сигнали.

Якщо ж на складі може зберігатися різнорідна продукція, кількість продукції певного виду, яка може бути прийнято на склад, залежить від того, скільки продукції інших видів зберігається там в даний момент. Це приклад керованої величини місткості складу. В кожен момент часу максимальна кількість продукції даного виду регламентується за допомогою певного вхідного сигналу $r(t)$. Отримаємо наступний опис автомату:

$$b(t+1) = \min \{r(t), \max (0, b(t) + x(t) - y(t))\}.$$

Блок з генерацією випадкових величин. Моделювання процесів функціонування фірми в умовах невизначеності вимагає урахування випадкових факторів. Розглянемо можливість відображення випадкових чинників при побудові імітаційних моделей для автоматної моделі фірми. Для відтворення в моделі функціонування компонентів реальної системи передбачені методи, що дозволяють генерувати випадкові величини з потрібними законами розподілу.

В основі методів генерації випадкових величин лежить можливість отримання послідовності псевдовипадкових чисел, рівномірно розподілених на інтервалі $[0,1]$. Датчики псевдовипадкових чисел передбачені у будь-яких універсальних алгоритмічних мовах та спеціалізованих мовах імітаційного моделювання. У мові програмування Python послідовність псевдовипадкових чисел можна отримати з допомогою функції `random.random()` з модуля `random`. Однак, з метою здійснення контролю періодичності псевдовипадкових чисел, доцільно використовувати так звані псевдовипадкові послідовності, згенеровані комп'ютером за допомогою спеціальних підпрограм.

Розглянемо процес отримання псевдовипадкових чисел, рівномірно розподілених на відрізку $[0,1]$. В основу побудови програми покладено теоретико-числовий метод, запропонований Н. М. Коробовим [8]. Послідовності випадкових чисел, отримані цим методом, дають досить хорошу відповідність рівномірному закону розподілу.

Вихідними даними для отримання рівномірно розподілених на відрізку $[0,1]$ псевдовипадкових чисел служать два додатніх цілих числа p і g , причому p повинно бути простим і представленим у вигляді $p = 2p_1 + 1$, де p_1 - також деяке додатнє число. При цьому g має бути близьким до половини числа p і допускати подання у вигляді $g = p - 3m$, де m деяке додатнє ціле.

Якщо за допомогою фігурних дужок позначити операцію взяття дробової частини числа, а за допомогою квадратних - операцію виділення цілої частини, то послідовність рівномірно розподілених на відрізку $[0,1]$ випадкових чисел $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ може бути отримана за рекурентними формулами:

$$R_k = r_{k-1} \cdot g, \quad \xi_k = \{R_k / p\}; \quad r_k = R_k - p \cdot [R_k / p], \quad k=1,2,3 \dots \quad (1)$$

де R_k і r_k - проміжні послідовності та $r_0=1$.

При застосуванні методу Коробова Н. М. псевдовипадкові числа повторюються з періодом $p-1$. Числа p і g , що є вихідними даними для роботи програми, вибираються так, щоб свідомо уникнути повторення в ході

вирішення всього завдання. Якщо для прикладу вхідним константам надати конкретні значення: $p=823926$, $g=63012$, то період повторюваних випадкових чисел буде 823925, що становить досить велику величину. Для генерації випадкових величин, що мають закони розподілу, використовуємо метод перетворення [2].

Суть даного методу ґрунтується на наступних положеннях. Припустимо, хочемо отримати реалізацію випадкової величини X з функцією розподілу $F(X) = P\{X \leq x\}$. Можна показати, що якщо R - випадкова величина на інтервалі $[0,1]$, із співвідношення $F(X) = R$ можна знайти $x = F^{-1}(R)$, де F^{-1} - функція, зворотня до F .

Таким чином, генерація довільно розподіленої величини за допомогою методу перетворення полягає у виконанні наступних кроків:

- а) побудові інтегральної функції розподілу $F(X)$;
- б) визначення зворотної функції $F^{-1}(x)$;
- в) отриманні рівномірно розподіленого на інтервалі $[0,1]$ випадкового числа R ;
- г) обчислення значення $x = F^{-1}(R)$.

Успішне використання методу зворотного перетворення визначається наявністю простого способу обчислення функції, оберненої F . Послідовність псевдовипадкових чисел, розподілених нормально з параметрами μ і σ , можна отримати способом, заснованим на наближеній імітації умов, за яких виявляється справедливою центральна гранична теорема теорії ймовірностей.

Для прикладу побудуємо імовірнісно-автоматну модель діяльності підприємства з виробництва гофрованих піддонів, які використовуються для перевезення вантажів. Основним видом діяльності підприємства є виробництво великогабаритної тари (гофрованих піддонів). Можливість збирання піддонів безпосередньо на місці їх використання дає переваги в зниженні витрат на зберігання та транспортування гофрованих піддонів.

Підприємство щодня на основі укладених договорів отримує замовлення на виготовлення гофрованих піддонів та здійснює виробництво. Запаси i -го виду ($i = 1, 2, 3, 4$) сировини на складі поповнюються одночасно за всіма видами декілька разів на місяць. Обсяги замовлень на виготовлення гофрованих піддонів є випадковою величиною β , а обсяги поповнення сировини – випадкові величини μ_0, μ_1, μ_2 та μ_3, μ_4 .

Внутрішні стани автоматів моделі відобразимо наступним чином:

$c(t)$ – проміжок часу від моменту t до моменту поповнення запасів основної сировини, *днів*;

$s(t)$ – величина замовлення на виготовлення гофрованих піддонів на момент часу t , *шт*;

d_i - нормативні витрати i -го виду основної сировини на виготовлення одного гофрованого піддону (для $i=1, 2, 3$ в кв. м., для $i=4$ в кг.).

$Prod(t)$ - загальний обсяг випуск гофропіддонів на момент часу t , *шт.*;

$Cost_1(t)$ – витрати сировини 1 на виготовлення продукції (гофропіддонів) згідно із замовленнями на момент часу t , *кв.м*;

$Cost_2(t)$ – витрати сировини 2 на виготовлення продукції (гофропіддонів) згідно із замовленнями на момент часу t , *кв.м*;

$Cost_3(t)$ – витрати сировини 3 на виготовлення продукції (гофропіддонів) згідно із замовленнями на момент часу t , *кв.м*;

$Cost_4(t)$ – витрати сировини 4 на виготовлення продукції (гофропіддонів) згідно із замовленнями на момент часу t , *кг*;

$Add_i(t)$ – поповнення запасів сировини i ($i=1, 2, 3$) на момент часу t , *кв.м.*;

$Add_4(t)$ – поповнення запасів сировини 4 на момент часу t , *кг.*;

$Stock_i(t)$ - запаси сировини i ($i=1, 2, 3$) на складі на момент часу t , *кв.м.*;

$Stock_4(t)$ - запаси сировини 4 на складі на момент часу t , *кг*;

Матриця алфавітів моделі відображена в таблиці 4. При побудові були використані наступні позначення [2, с. 67], де P – множина всіх додатніх чисел, R – множина всіх невід’ємних раціональних чисел; R – двійковий алфавіт

(множина з двох символів: 0 та 1); $\emptyset$ – порожня множина. Вектор початковий станів моделі був сформований на основі статистичних даних підприємства та відображений в першому рядку розрахункових таблиць 7 та 8.

Таблиця 4. Матриця алфавітів

	C	S	Prod	Cost	Add	Stock
C	P	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	Д	$\emptyset$
S	$\emptyset$	P	P	P	$\emptyset$	$\emptyset$
Prod	$\emptyset$	$\emptyset$	R	R	$\emptyset$	$\emptyset$
Cost	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	R	$\emptyset$	R
Add	Д	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	P	P
Stock	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	$\emptyset$	R

Система функцій виходів автоматної моделі має вигляд: $y_1(t) = 1$ при $c(t) = 1$ і $y_1(t) = 0$ при $c(t) > 1$. Сигнал отримує значення одиниці, коли в наступний момент часу відбудеться поповнення i -ої сировини і нульове значення в іншому випадку; $y_2(t) = s(t)$. Таблиця умовних функціоналів переходів відображена в таблиці 5.

Таблиця 5. Таблиця умовних функціоналів переходів

C	$c(t) > 1$	$c(t) = 1$
	$c(t) = 1$	μ_0
S	β	
$Cost_i(t)$	$s(t)d_i$	
$Prod(t)$	$s(t)$	
$Add_1(t)$	$c(t) > 1$	$c(t) = 1$
	$c(t) = 1$	μ_1
$Add_2(t)$	$c(t) > 1$	$c(t) = 1$
	$c(t) = 1$	μ_2
$Add_3(t)$	$c(t) > 1$	$c(t) = 1$
	$c(t) = 1$	μ_3
$Add_4(t)$	$c(t) > 1$	$c(t) = 1$
	$c(t) = 1$	μ_4
$Stock_i(t)$	$Stock_i(t) - Cost_i(t+1) + Add_i(t+1)y_1(t)$	

Для моделювання незалежних випадкових величин моделі приймалась гіпотеза про нормальний розподіл обсягів замовлень гофрованих піддонів та обсягів поповнення сировини. Розрахунки автоматної моделі виконувались в середовищі Microsoft Excel з використанням вбудованих можливостей генерації випадкових величин.

**Таблиця 6. Результати розрахунків автоматної моделі виробництва
гофрованих піддонів. Частина 1**

T	C	S	Prod	Cost₁	Cost₂	Cost₃	Cost₄
0	1	2940	3100	8280	6360	2940	1200
1	13	2920	2940	8114	6233	2881	1176
2	12	2921	2920	8058	6190	2861	1168
3	11	2935	2921	8061	6192	2862	1168
4	10	2911	2935	8100	6222	2876	1174
5	9	2904	2911	8034	6171	2853	1164
6	8	2951	2904	8015	6156	2846	1162
7	7	3004	2951	8144	6256	2892	1180
8	6	2944	3004	8292	6369	2944	1202
9	5	2937	2944	8125	6241	2885	1178
10	4	2904	2937	8107	6227	2879	1175
11	3	2962	2904	8014	6156	2845	1161
12	2	2918	2962	8176	6280	2903	1185
13	1	2929	2918	8053	6186	2860	1167
14	17	2942	2929	8084	6209	2870	1172
15	16	2960	2942	8119	6236	2883	1177
16	15	2931	2960	8169	6275	2901	1184

**Таблиця 7. Результати розрахунків автоматної моделі виробництва
гофрованих піддонів. Частина 2**

Add₁	Add₂	Add₃	Add₄	Stock₁	Stock₂	Stock₃	Stock₄
				54000	44800	21000	8400
55690	44588	21020	8423	101576	83155	39139	15647
				93518	76965	36277	14479
				85457	70773	33415	13311
				77356	64551	30539	12137
				69323	58380	27686	10972
				61308	52224	24840	9811
				53163	45968	21949	8630
				44872	39599	19004	7429
				36746	33358	16119	6251
				28639	27131	13241	5076
				20625	20975	10395	3915
				12449	14695	7492	2730
				4396	8509	4633	1563
55982	44617	20984	8386	52293	46917	22746	8777
				44175	40681	19863	7600
				36006	34406	16962	6417

Під час розрахунків за допомогою генераторів випадкових величин було отримано дані для автомату S (обсяги замовлень гофропіддонів), а також для автоматів $Add_i(t)$ ($i=1...4$) (обсяги поповнення складу сировиною). Отримані результати моделювання відображають динаміку запасів необхідної сировини протягом 16 днів. Автоматна модель відповідно до швидкості використання всіх видів сировини прораховує та включає додаткову поставку на 14 день моделювання.

Висновки та перспективи подальших розвідок у даному напрямі. В статті представлено алгоритм побудови імітаційної моделі, запропоновано універсальну структуру імітаційної моделі поведінки фірми з чотирьох блоків з описом автоматної моделі кожного з блоків. Розроблена ймовірісно-автоматна модель на прикладі виробництва гофропіддонів дала можливість протестувати виробничий процес з врахуванням чинників невизначеності (попит на продукцію та обсяги постачання сировини). За умови певної адаптації вона може бути використана для моделювання інших виробничих процесів підприємства та прогнозування показників, на основі яких приймаються рішення топ-менеджерами компаній.

В умовах невизначеності підприємство повинно використовувати потенціал гнучкості, адаптації до нових умов, швидко приймати рішення та використовувати нові можливості задля збереження стійкості й конкурентоспроможності. Ключовою ознакою сучасного бізнес-середовища є активне використання цифрових технологій для автоматизації бізнес-процесів, які дозволяють знижувати витрати та підвищувати ефективність діяльності. Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на інтеграцію запропонованого підходу в автоматному моделюванні поведінки фірми з ІІІ-асистентами для оптимізації складних процесів управління виробництвом та підвищення адаптивності компаній до швидкоплинних змін на ринку.

Література

1. Бакаєв А. А., Костіна Н. І., Яровицький Н. В. Імітаційні моделі в економіці. Київ: Наукова думка, 1978, 304 с.
2. Бакаєв А. А., Гриценко В. І., Сакунова І. С. Автоматне моделювання в задачах дослідження складних систем. Київ: Логос, 2007, 208 с.
3. Мерінова С. В., Половенко Л. П. Імітаційне моделювання в управлінні логістичними системами. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*, № 6(17). 2018. С. 264-268.
4. Грицюк, Ю. І., Грицюк, М. Ю. Моделювання стратегій поведінки конкурентних фірм на ринку надання туристичних послуг. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2016. № 650. с. 50-62.
5. Жихаревич В. В., Мацюк Н. О. (2013). Клітинно-автоматне моделювання динаміки обсягів продажів торговельного підприємства. *Бізнес Інформ*. 2013. С. 75-79.
6. Даніч В. М. (2019). Моделювання динаміки менталітету суб'єкта масових комунікацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Економічна»*. Харків, 2019. № 96. С. 15-23.
7. Tîrnăuică C., Montaña J. L., Ontañón S., González, A. J. and Pardo L. M. Behavioral Modeling Based on Probabilistic Finite Automata: An Empirical Study. *Sensors (Basel)*. 2016. Vol 16(7), 958 p. URL: <https://doi.org/10.3390/s16070958>
8. Korobov N. M. (1964). *Number Theory*. Amsterdam: North-Holland Publishing Company, 237 p.
9. Alur R. Formal Analysis of Hierarchical State Machines. *Verification: Theory and Practice. Lecture Notes in Computer Science*. 2003. Vol. 2772. Pp. 34-60. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-540-39910-0_3
10. Alur R., Kannan S. and Yannakakis, M. Communicating Hierarchical State Machines. *Automata, Languages and Programming. Lecture Notes in Computer Science*. 1999. Vol. 1644. Pp. 169-178. URL: https://doi.org/10.1007/3-540-48523-6_14

11. Gallegati M. and Richiardi M. G. Agent-Based Models in Economics and Complexity. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*. Springer, New York, 2009. Pp. 200-225. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_14

12. Tesfatsion L. Agent-Based Computational Economics: Overview and Brief History. *Artificial Intelligence, Learning and Computation in Economics and Finance*. Iowa State University, Department of Economics, 2023. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15294-8_4

References

1. Bakaiev, A.A. Kostina, N.I. and Yarovyts'kyj, N.V. (1978), *Imitatsijni modeli v ekonomitsi* [Simulation models in economics], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

2. Bakaiev, A.A. Hrytsenko, V.I. and Sakunova, I.S. (2007), *Avtomatne modeliuвання v zadachakh doslidzhennia skladnykh system* [Automated modeling in complex systems research tasks], Lohos, Kyiv, Ukraine.

3. Merinova, S.V. and Polovenko, L.P. (2018), “Simulation modeling in logistics systems management”, *Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia*, vol. 6(17), pp. 264-268.

4. Hrytsiuk, Yu.I. and Hrytsiuk, M.Yu. (2016), “Modeling behavior strategies of competitive firms in the tourism services market”, *Visnyk Natsional'noho universytetu “L'vivs'ka politekhnika”*, vol. 650, pp. 50-62.

5. Zhykharevych, V.V. and Matsiuk, N.O. (2013), “Cellular automaton modeling of sales dynamics in a commercial enterprise”, *Biznes Inform*, vol. 2, pp. 75-79.

6. Danich, V.M. (2019), “Modeling the dynamics of the mentality of a mass communication subject”, *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V. N. Karazina. Serii “Ekonomichna”*, vol. 96, pp. 15-23.

7. Tîrnăucă, C. Montaña, J.L. Ontañón, S. González, A. J. and Pardo, L. M. (2016), “Behavioral Modeling Based on Probabilistic Finite Automata: An

Empirical Study”, *Sensors (Basel)*, vol. 16(7), pp. 958. <https://doi.org/10.3390/s16070958>.

8. Korobov, N.M. (1964), *Number Theory*, North-Holland Publishing, Company, Amsterdam.

9. Alur, R. (2003), “Formal Analysis of Hierarchical State Machines”, *Verification: Theory and Practice. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2772, pp. 34-60. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39910-0_3.

10. Alur, R. Kannan, S. and Yannakakis, M. (1999), “Communicating Hierarchical State Machines”, *Automata, Languages and Programming. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1644, pp. 169-178. https://doi.org/10.1007/3-540-48523-6_14.

11. Gallegati, M. and Richiardi, M.G. (2009), “Agent-Based Models in Economics and Complexity”, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pp. 200-225. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30440-3_14.

12. Tesfatsion, L. (2023), “Agent-Based Computational Economics: Overview and Brief History”, *Artificial Intelligence, Learning and Computation in Economics and Finance*. Iowa State University, Department of Economics, pp. 169-178. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15294-8_4.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2025 р.