

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проектами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій

"Допущений до захисту"

Завідувач кафедри ІУСТ



к.т.н, доц. Михелєв І.Л.

" ____ " _____ 2025 р.

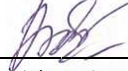
КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти "бакалавр"

на тему:

«РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДСЬКОГО ПРИМІЩЕННЯ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ 3-D РЕСУРСІВ»

Виконала: студентка групи 4149


(підпис)

Ялова В. Є.

Керівник роботи:

доктор технічних наук, професор
кафедри комп'ютерних технологій та
інформаційної безпеки

(посада, науковий ступінь вчене звання)



(підпис)

Передерій В. І.

м. Миколаїв – 2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Навчально-науковий інститут комп'ютерних наук та управління проектами
Кафедра інформаційних управляючих систем та технологій
Спеціальність 122 "Комп'ютерні науки"
Освітня програма "Комп'ютерні науки"

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Гарант освітньої програми

к.т.н, доц. Гайда А.Ю.

" ____ " ____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ на здобуття ступеня вищої освіти "бакалавр"

Студентці Яловії Вікторії Євгеніївній

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка імітаційної моделі складського приміщення із застосуванням 3-D ресурсів

Керівник роботи: Передерій Віктор Іванович

Затверджені наказом ректора № 295-уч від "27" березня 2025 року.

2. Термін подання роботи: 20 червня 2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) ДСТУ щодо обробки інформації, літературні джерела, технічна документація на існуючі аналоги систем, 3-D модель складського приміщення.

4. Перелік питань, що належать до розробки (найменування розділів): Вступ; 1. Основні особливості організації імітаційних моделей з застосуванням 3-D ресурсів; 2. Аналіз та характеристика цифрових форматів 3-D моделей; 3. Розробка та дослідження імітаційної моделі складського приміщення з використанням методів м'яких обчислень; 4. Охорона праці; Висновки; Список літератури.

5. Перелік презентаційних матеріалів: графічний матеріал згідно виконаних досліджень представлено на слайдах презентації роботи.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Передерій В.І.	03.02.2025 	22.02.2025 
2	Передерій В.І.	22.02.2025 	21.03.2025 
3	Передерій В.І.	21.03.2025 	25.04.2025 
4	Передерій В.І.	25.04.2025 	07.06.2025 

7. Дата видачі завдання 03 лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної галузі	13.02.2025	Виконала
2	Постановка задачі	15.02.2025	Виконала
3	Розробка концепції	22.02.2025	Виконала
4	Розробка проекту ІС	21.03.2025	Виконала
5	Реалізація проекту	25.04.2025	Виконала
6	Розробка питань з охорони праці	07.06.2025	Виконала
7	Розробка графічних матеріалів	12.06.2025	Виконала
8	Подання роботи на перевірку на плагіат	10.06.2025	Виконала
9	Подання роботи рецензенту	15.06.2025	Виконала
10	Подання роботи на захист	20.06.2025	Виконала

Студентка

(підпис)

Ялова В. Є.

(ПІБ)

Керівник роботи

Передерій В. І.

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено імітаційну модель із використанням тривимірних ресурсів, що забезпечує візуалізацію й аналіз складних систем у режимі реального часу.

Актуальність дослідження зумовлена зростаючим попитом на цифрові технології в управлінні виробничими та логістичними процесами.

Розглянуто основні види імітаційного моделювання, цифрові формати 3D-ресурсів, сучасні інструменти розробки та їхні можливості. Здійснено аналіз методів побудови моделей і факторів, що впливають на ефективність візуалізації.

З метою оцінювання ефективності моделей застосовано методи м'яких обчислень, зокрема Байєсівську мережу довіри та експертні оцінки, що дозволяє враховувати невизначеність і гнучко підходити до аналізу.

Результатом дослідження стала розробка імітаційної моделі з 3D-візуалізацією, що може бути адаптована під різні типи виробничих або логістичних процесів. Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень, впровадження цифрових двійників та навчання персоналу в умовах віртуального середовища.

Ключові слова: 3D-ресурси, тривимірна візуалізація, імітаційне моделювання, дискретно-подвійне моделювання, системна динаміка, агентне моделювання, Баєсівська мережа довіри, фактор впливу, експертні оцінки.

ABSTRACT

In the bachelor's qualification work, a simulation model using three-dimensional resources was developed, which provides visualization and analysis of complex systems in real time.

The relevance of the study is due to the growing demand for digital technologies in the management of production and logistics processes.

The main types of simulation modeling, digital formats of 3D resources, modern development tools and their capabilities were considered. An analysis of model construction methods and factors affecting the effectiveness of visualization was carried out.

In order to assess the effectiveness of models, soft computing methods were used, in particular, the Bayesian Trust Network and expert assessments, which allows taking into account uncertainty and a flexible approach to analysis.

The result of the study was the development of a simulation model with 3D visualization, which can be adapted to different types of production or logistics processes. The results obtained can be used for further research, the implementation of digital twins and training personnel in a virtual environment.

Keywords: 3D resources, three-dimensional visualization, simulation modeling, discrete-dual modeling, system dynamics, agent modeling, Bayesian trust network, influence factor, expert assessments.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

3D — тривимірна візуалізація.

DES – Дискретно-подійне моделювання.

SD – Системна динаміка.

ABM – Агентне моделювання.

БМД – Баєсівська мережа довіри.

F – фактор впливу.

$P(X)$ – ймовірність події X.

K_0 – коефіцієнт конкордації (узгодженості експертних оцінок).

n – кількість оцінюваних факторів.

m – кількість експертів.

ЗМІСТ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D – РЕСУРСІВ.....	12
1.1 Визначення та види імітаційного моделювання.....	12
1.2 Застосування 3D-ресурсів у моделюванні логістичних і виробничих систем.....	20
1.3 Огляд існуючих платформ та інструментів.....	29
Висновки до розділу 1.....	42
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ЦИФРОВИХ ФОРМАТІВ 3D – МОДЕЛЕЙ.....	43
2.1 Аналіз середовищ розробки імітаційних моделей із застосуванням 3D-ресурсів.....	43
2.2 Аналіз алгоритмів та методів побудови імітаційних моделей.....	57
2.3 Постановка задачі моделювання складського приміщення та визначення вимог до моделі.....	66
Висновки до розділу 2.....	69
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ М'ЯКИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....	70
3.1 Визначення основних факторів ефективності імітаційних моделей із застосуванням 3D – ресурсів.....	70
3.2 Оцінка ефективності імітаційних моделей із застосуванням 3D – ресурсів з використанням методів м'яких обчислень.....	73
3.3 Вибір середовища розробки імітаційної моделі із застосуванням 3D – ресурсів.....	78
3.3.1 Створення скриптового ресурсу.....	79
3.3.2 Розробка скрипта внутрішнього чату.....	85
3.3.3 Розробка скрипту роботи камери для демонстрації моделі.....	90

Висновки до розділу 3.....	93
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	95
4.1 Законодавче та нормативне забезпечення охорони праці користувачів ПК.....	95
4.2 Виробничі шкідливі і небезпечні фактори при роботі з ПК.....	96
4.3 Вимоги до організації робочого місця користувача ПК.....	98
4.4 Режим праці та відпочинку при роботі за ПК.....	99
4.5 Робочий інвентар та обладнання.....	100
4.6 Профілактика професійних захворювань при роботі з ПК.....	101
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	

ВСТУП

Розробка та дослідження імітаційних моделей із використанням 3D-ресурсів є важливою складовою сучасного цифрового моделювання. Вона дозволяє візуалізувати та аналізувати складні процеси у динаміці, підвищуючи точність прогнозування, ефективність планування та якість прийняття рішень у виробничих і логістичних системах. Застосування тривимірної графіки в моделюванні сприяє кращому розумінню структури та взаємодії елементів системи, а також дозволяє створювати наочні цифрові двійники реальних об'єктів.

У кваліфікаційній роботі буде досліджено ефективність використання 3D-ресурсів у процесі створення імітаційних моделей. Проведений аналіз дозволить обґрунтувати вибір програмного середовища для моделювання, враховуючи технічні вимоги, зручність візуалізації та можливості автоматизації. Також буде визначено оптимальні інструменти та методи розробки, які сприятимуть підвищенню точності, функціональності та адаптивності імітаційних моделей для практичного застосування у цифровому виробництві.

Актуальність роботи:

Сучасне виробництво потребує високого рівня автоматизації та оптимізації процесів, що зумовлено зростаючими вимогами до продуктивності, гнучкості та ефективності управління ресурсами. Одним із ключових підходів до вирішення цих завдань є використання імітаційного моделювання, яке дозволяє досліджувати виробничі процеси в умовах мінливого попиту, обмежених ресурсів та технологічних обмежень.

Особливу роль у цьому процесі відіграє інтеграція 3D-ресурсів, яка забезпечує візуалізацію моделей, підвищує точність і достовірність симуляцій, а також дозволяє аналізувати взаємодію компонентів у просторі. Водночас ефективність імітаційних моделей залежить від продуктивності обчислень,

рівня деталізації 3D-об'єктів, використання методів оптимізації та інтеграції інтелектуальних алгоритмів.

Значний внесок у підвищення ефективності імітаційного моделювання вносять методи м'яких обчислень, що дозволяють адаптивно налаштовувати параметри моделі, прогнозувати виробничі показники та мінімізувати невизначеність.

Таким чином, розробка імітаційної тривимірної моделі складського приміщення є актуальним науковим завданням, яке спрямоване на підвищення продуктивності та забезпечення ефективного управління ресурсами.

Мета дослідження: Розробити імітаційну модель складського приміщення із застосуванням 3-D ресурсів.

Завдання дослідження:

- Визначити поняття та види імітаційного моделювання.
- Розглянути застосування 3D-ресурсів у моделюванні логістичних і виробничих систем.
- Розглянути існуючі платформи.
- Проаналізувати середовища розробки імітаційних моделей з застосуванням 3D – ресурсів.
- Провести аналіз алгоритмів та методів побудови імітаційних моделей.
- Визначити ключові фактори, що впливають на ефективність моделі, з урахуванням методів м'яких обчислень.
- Розробити 3D-модель складського приміщення.

Об'єкт дослідження: моделі, методи та інформаційні технології оцінки та забезпечення ефективності імітаційних моделей із застосуванням 3D-ресурсів.

Предмет дослідження: сукупність теоретичних та практичних засад імітаційного моделювання із використанням 3D-ресурсів, а також методи і інструменти для оцінки та забезпечення ефективності таких моделей.

Методи дослідження: Методи імітаційного моделювання, системний аналіз, графо-аналітичні методи Баєсівської мережі довіри, теорія експертних оцінок.

Наукова новизна одержаних результатів: Побудовано імітаційну 3D-модель складського приміщення, що дозволяє візуалізувати логістичні процеси та підготуватись до подальших етапів їх планування.

Очікуваний результат: Розробка ефективної імітаційної моделі складських приміщень із застосуванням 3D-ресурсів, яка забезпечить наочну візуалізацію та дозволить здійснювати детальний аналіз виробничо-логістичних процесів. Результат дослідження допоможе оптимізувати управлінські рішення та підвищити продуктивність системи.

Дипломна робота є самостійним дослідженням, що включає теоретичні розділи, аналітичну частину, визначення основних факторів впливу на ефективність імітаційних моделей та оцінку їх результативності. Робота базується на актуальних наукових публікаціях, а також даних, отриманих в результаті розробки імітаційних моделей складських приміщень із застосуванням 3D-ресурсів.

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ОРГАНІЗАЦІЇ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ 3D – РЕСУРСІВ

1.1 Визначення та види імітаційного моделювання.

Імітаційне моделювання є потужним інструментом дослідження складних систем, що дозволяє відтворити їхню поведінку в умовах, максимально наближених до реальних, без необхідності втручання у сам об'єкт. Воно дає змогу аналізувати структуру системи, її елементи, взаємозв'язки, динаміку функціонування, оцінювати ефективність функціонування за різних сценаріїв, а також прогнозувати наслідки прийняття тих чи інших рішень. Імітаційні моделі застосовуються в найрізноманітніших галузях – від виробництва і логістики до медицини, екології та соціальних наук [35]. Актуальність їх використання постійно зростає в умовах цифрової трансформації та потреби в гнучкому, адаптивному управлінні процесами.

Імітаційне моделювання – це метод дослідження та аналізу складних систем шляхом їх відтворення у віртуальному середовищі. Воно дозволяє вивчати динаміку системи, прогнозувати можливі сценарії її функціонування та тестувати різні гіпотези без реального втручання у процес. Імітаційні моделі широко застосовуються в промисловості, логістиці, охороні здоров'я, міському плануванні, освіті та багатьох інших областях [10].

Імітаційне моделювання засноване на створенні математичних та алгоритмічних моделей, які є спрощеним, але достовірним відображенням реального об'єкта або процесу [4]. В основі методу лежить використання обчислювальних потужностей для аналізу безлічі можливих сценаріїв, виявлення вузьких місць та оцінки ефективності рішень.

Процес створення імітаційної моделі включає кілька послідовних кроків:

1. Визначення мети та об'єкта моделювання – постановка проблеми, формулювання ключових питань дослідження.
2. Збір та аналіз даних – вивчення системи, збирання статистичної інформації, визначення параметрів моделі.

3. Розробка концептуальної моделі – побудова логічної структури моделі, вибір методології.
4. Реалізація моделі – програмна реалізація моделі у вибраному середовищі.
5. Калібрування та валідація – тестування моделі на реальних даних, перевірка відповідності вихідних параметрів реальним процесам.
6. Експерименти та аналіз результатів - проведення серії симуляцій, дослідження різних сценаріїв, оптимізація параметрів.
7. Документування та впровадження - подання результатів дослідження, практичне застосування моделі.

Переваги імітаційного моделювання:

- Дозволяє аналізувати складні системи без втручання у реальний процес.
- Забезпечує можливість дослідження різних сценаріїв роботи системи.
- Підтримує ухвалення управлінських рішень на основі аналізу даних.
- Покращує процеси планування та оптимізації у різних галузях.

Обмеження імітаційного моделювання:

- Висока трудомісткість розробки моделей.
- Необхідність великої кількості даних для вірогідності моделювання.
- Високі обчислювальні витрати за складних моделей.

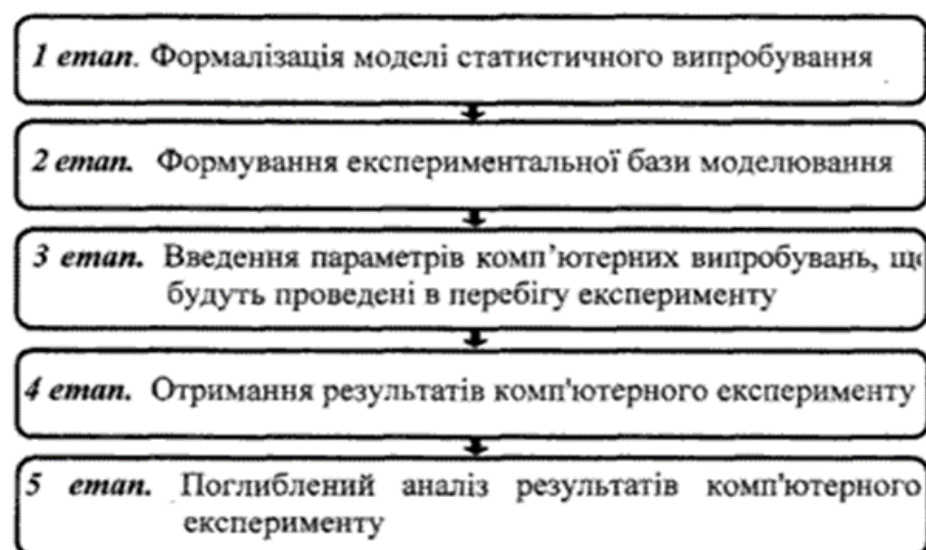


Рис. 1.1 – Етапи імітаційного моделювання

Існує кілька основних підходів до імітаційного моделювання, що відрізняються принципами побудови моделей, способом представлення часу, логікою функціонування елементів та рівнем деталізації. Основні види імітаційного моделювання включають дискретно-подійне моделювання, агентне моделювання, моделювання на основі системної динаміки та гібридні моделі, які поєднують елементи кількох підходів [5].

Дискретно-подійне моделювання (Discrete-Event Simulation, DES) – це метод імітаційного моделювання, при якому система представляється у вигляді послідовності дискретних подій, кожна з яких змінює її стан. Час у таких моделях рухається від однієї події до іншої, а не безперервно [13].

DES широко застосовується для моделювання систем із явно вираженими моментами подій, такими як виробничі лінії, транспортні мережі, системи масового обслуговування (банки, лікарні, склади).

Основні принципи DES:

1. Подієвий механізм – система змінює свій стан лише у моменти настання подій.
2. Черга подій – кожна подія додається до списку та обробляється по порядку.
3. Структура моделі – модель містить елементи, такі як ресурси, процеси та агенти.

Галузі застосування DES:

1. Логістика та транспорт – оптимізація роботи складів, керування вантажопотоками – оптимізація роботи складів, керування вантажопотоками. Приклад: аналіз роботи розподільчого центру Amazon поліпшення логістики.
2. Виробничі системи – оптимізація складальних ліній, керування виробничими процесами. Приклад: моделювання роботи конвеєра автомобільного заводу Toyota.
3. Системи масового обслуговування – оптимізація черг у банках, лікарнях, аеропортах. Приклад: аналіз роботи касових терміналів у супермаркетах з

метою мінімізації часу очікування клієнтів.

Переваги використання DES:

- Висока точність моделювання дискретних процесів.
- Можливість оптимізації та прогнозування вузьких місць.
- Широка застосовність у різних галузях.

Недоліки використання DES:

- Висока обчислювальна складність зі збільшенням кількості подій.
- Складність калібрування моделі та інтерпретації результатів.

Агентне моделювання (Agent-Based Modeling, ABM) – це метод імітаційного моделювання, в якому система представляється у вигляді безлічі незалежних агентів, що взаємодіють між собою та з середовищем. Кожен агент наділений певними характеристиками, правилами поведінки та може адаптуватися до змін навколишнього середовища [20].

ABM широко застосовується в економіці, соціології, біології, логістиці та дослідженнях складних систем, де поведінка макросистеми виникає як результат взаємодії багатьох агентів.

Основні принципи ABM:

1. Агенти – автономні об'єкти із заданими характеристиками та поведінкою.
2. Середовище – простір, у якому діють агенти.
3. Взаємодія – агенти можуть обмінюватися інформацією, конкурувати чи співпрацювати.
4. Емерджентність – складна поведінка системи формується із простих взаємодій агентів.
5. Адаптація – агенти можуть змінювати поведінку з урахуванням накопиченого досвіду чи вхідних даних.

Галузі застосування ABM:

1. Економіка та управління – аналіз поведінки споживачів та ринків.
Приклад: моделювання поведінки покупців у інтернет-магазині.
2. Соціологія та психологія – дослідження динаміки соціальних мереж, поширення інформації та паніки. Приклад: моделювання впливу

фейкових новин у соціальних мережах.

3. Біологія та екологія – вивчення популяцій, екосистем, еволюції. Приклад: моделювання поведінки мурах у колонії.
4. Логістика та транспорт – оптимізація дорожнього руху та управління вантажоперевезеннями. Приклад: моделювання потоків міського трафіку для оптимізації світлофорів.

Переваги використання АВМ:

- Висока гнучкість та адаптивність до складних систем.
- Можливість моделювати нелінійні та емерджентні процеси.
- Реалістичне відтворення індивідуальної поведінки агентів.

Недоліки використання АВМ:

- Висока обчислювальна складність зі збільшенням кількості агентів.
- Необхідність великої кількості даних для калібрування моделі.
- Проблеми в інтерпретації отриманих результатів.

Системна динаміка (System Dynamics, SD) – це метод моделювання, що використовується для аналізу та прогнозування поведінки складних систем у часі. Метод заснований на представленні системи у вигляді набору взаємодіючих рівнів (stocks), потоків (flows) та зворотних зв'язків (feedback loops).

SD часто використовується для вивчення макроекономічних процесів, управління ресурсами, екології, охорони здоров'я та бізнесу.

Основні принципи DS:

1. Логіка потоків і запасів – система представляється як сховищ ресурсів (stocks), які змінюються рахунок потоків (flows).
2. Зворотні зв'язки – вплив змінних друг на друга, що формує складні динамічні процеси.
3. Диференціальні рівняння – математична основа, яка описує зміни у системі у часі.
4. Графічне уявлення – моделі будуються як діаграм впливів (Causal Loop Diagrams , CLD) та діаграм потоків та запасів (Stock and Flow Diagrams ,

SFD).

Галузі застосування DS:

1. Економіка та управління ресурсами – аналіз ринку праці, прогнозування попиту та пропозиції. Приклад: модель динаміки інфляції та відсоткових ставок.
2. Екологія та сталий розвиток – управління водними ресурсами, моделювання зміни клімату. Приклад: прогноз зміни рівня води у водосховищах.
3. Бізнес та управління підприємствами – оптимізація ланцюгів постачання, моделювання фінансових потоків. Приклад: управління запасами складі для мінімізації витрат.
4. Медицина та охорона здоров'я – аналіз поширення епідемій, оптимізація системи охорони здоров'я. Приклад: модель поширення грипу та ефективності вакцинації.

Переваги використання DS:

- Дозволяє аналізувати складні системи з безліччю взаємозв'язків.
- Забезпечує наочне уявлення процесів.
- Підходить для довгострокового прогнозування та стратегічного планування.

Недоліки використання DS:

- Потрібна велика кількість даних для точного моделювання.
- Обмежена точності при роботі з дискретними процесами.
- Не завжди враховує випадкові фактори та зовнішні впливи.

Критерій	Дискретно- подійне моделювання (DES)	Агентне моделювання (ABM)	Системна динаміка (SD)
Принцип роботи	Модель складається з подій, які змінюють стан системи в певні моменти часу.	Взаємодія автономних агентів, які приймають рішення відповідно до заданих правил.	Використання диференціальних рівнянь для моделювання безперервних змін.
Галузі застосування	Логістика, виробництво, управління чергами.	Соціальні науки, ринок, екологія.	Макроекономічне планування, аналіз попиту та пропозиції.
Рівень деталізації	Високий для операційних процесів, моделювання окремих подій.	Високий для моделювання взаємодій між індивідами.	Узагальнений рівень, акцент на макродинаміці системи.
Часові масштаби	Дискретний (події відбуваються у певні моменти часу).	Дискретний або гібридний (агенти можуть мати індивідуальні часові процеси).	Неперервний (динамічні рівняння керують поведінкою системи).
Гнучкість	Висока для процесів, які залежать від черг та ресурсів.	Дуже висока, підходить для складних гетерогенних систем.	Помірна, добре підходить для великих агрегованих систем.
Обчислювальна складність	Помірна, залежить від кількості подій.	Висока, особливо при збільшенні кількості агентів.	Відносно низька, але складність зростає з кількістю рівнянь.
Візуалізація	Графічні діаграми, блок-схеми.	2D та 3D-анімація агентів.	Графіки динамічних змін, каузальні діаграми.
Складність реалізації	Відносно проста, якщо є структуровані процеси.	Висока через велику кількість взаємодій між агентами.	Помірна, вимагає знання математичних моделей.

Рис. 1.2 – Порівняння видів імітаційного моделювання

Гібридні моделі є комбінацією різних підходів до імітаційного моделювання, таких як дискретно-подійне моделювання (DES), системна динаміка (SD) та агентне моделювання (ABM). Вони дозволяють точніше і детально описувати складні системи, інтегруючи переваги кожного методу [12].

Основні принципи гібридного моделювання

1. Комбінація різних рівнів деталізації - макроскопічне моделювання (SD) можна поєднувати з мікроскопічним (ABM) для отримання

комплексного аналізу системи.

2. Інтеграція різних типів взаємодій – наприклад, можна використовувати агентне моделювання для опису поведінки окремих елементів системи та дискретно-подійне моделювання для управління процесами.
3. Гнучкість і масштабованість – гібридні моделі можуть адаптуватися до умов, що змінюються, і забезпечувати високий ступінь деталізації моделюваних процесів.

Галузі застосування гібридних моделей:

1. Економіка та управління – моделювання макроекономічних процесів з урахуванням індивідуальної поведінки агентів. Приклад: аналіз динаміки ринку праці з урахуванням економічних чинників та поведінки працівників.
2. Медичні дослідження – дослідження поширення інфекційних захворювань, що поєднує епідеміологічні моделі (SD) та індивідуальні моделі передачі (ABM). Приклад: прогнозування поширення COVID-19 з урахуванням заходів соціальної дистанції.
3. Міське планування та транспорт – оптимізація транспортних потоків, що поєднує моделювання поведінки окремих водіїв (ABM) та макrorівневі транспортні моделі (DES). Приклад: моделювання роботи громадського транспорту для покращення маршрутизації.
4. Виробничі процеси та логістика – гібридні моделі допомагають керувати виробничими лініями, поєднуючи моделювання машин (DES) та поведінку операторів (ABM). Приклад: моделювання заводу з урахуванням часу роботи обладнання та персоналу.

Переваги використання гібридних моделей:

- Висока точність і деталізованість процесів, що моделюються.
- Можливість моделювати складні багатокомпонентні системи.
- Адаптація до різних рівнів деталізації системи.

Недоліки використання гібридних моделей:

- Підвищена обчислювальна складність.

- Складність калібрування та інтеграції різних моделей.
- Високі вимоги до програмного забезпечення та обчислювальних ресурсів.

Усі ці види імітаційного моделювання мають свої переваги та обмеження, і вибір конкретного методу залежить від цілей дослідження, типу системи, рівня доступної інформації та технічних можливостей. Сучасні програмні платформи, такі як AnyLogic, підтримують використання всіх трьох основних підходів та їх комбінування в межах одного проєкту. Це відкриває широкі можливості для створення детальних, реалістичних моделей, які здатні адекватно відображати реальні процеси та сприяти прийняттю обґрунтованих управлінських рішень [15].

У контексті застосування 3D-ресурсів у моделюванні, кожен із вищезгаданих підходів отримує додаткову візуальну складову, що сприяє кращому сприйняттю моделі, верифікації її структури, навчанню персоналу та презентації результатів дослідження. Інтеграція тривимірної візуалізації з імітаційними моделями значно підвищує ефективність роботи дослідника, менеджера або інженера, що приймає рішення на основі результатів моделювання [19].

Таким чином, імітаційне моделювання в сучасному розумінні є потужною міждисциплінарною технологією аналізу систем, що забезпечує гнучке, точне та ефективне моделювання реальних процесів із можливістю масштабування, адаптації та інтеграції новітніх цифрових підходів.

1.2 Застосування 3D-ресурсів у моделюванні логістичних і виробничих систем.

Із розвитком комп'ютерних технологій та програмного забезпечення зросла потреба у візуалізації складних процесів у логістиці та виробництві [1]. Одним з найефективніших інструментів, що дозволяє реалізувати таку візуалізацію, є тривимірні (3D) ресурси, які активно впроваджуються в імітаційне моделювання. Їх використання дає змогу не тільки відобразити структуру системи, а й наблизити її до реального вигляду, що сприяє точнішій

валідації моделей, ефективнішому прийняттю рішень і кращому розумінню процесів усіма учасниками проєкту.

3D-ресурси — це графічні об'єкти, що відтворюють фізичні компоненти системи в тривимірному просторі. До них можуть належати моделі виробничого обладнання, транспортних засобів, працівників, контейнерів, будівель тощо. Завдяки сучасним програмам моделювання, таким як AnyLogic, FlexSim, Tecnomatix Plant Simulation, ці об'єкти можуть мати не тільки візуальну форму, а й логіку поведінки, бути прив'язаними до певних сценаріїв або даних, змінюватися в процесі моделювання [38].

У моделюванні логістичних систем 3D-візуалізація виконує кілька важливих функцій. Вона дає змогу наочно представити просторове розміщення об'єктів — складів, транспортних маршрутів, вантажних терміналів, зон зберігання. Це дозволяє виявити можливі конфлікти або неефективності, наприклад, перехрещення потоків, вузькі місця в маршрутах, нераціональне розміщення ресурсів. Також вона сприяє оптимізації логістичних процесів — від вантаження до зберігання й транспортування — через зміну конфігурації об'єктів та перевірку різних варіантів у віртуальному середовищі. 3D-моделі дозволяють детально простежити маршрути переміщення вантажів, побачити процеси завантаження і розвантаження, взаємодію між підсистемами [25].

У виробничих системах застосування 3D-ресурсів дає змогу моделювати фізичні процеси, просторову структуру цеху, взаємодію обладнання і персоналу. Наприклад, можна змоделювати конвеєрні лінії, станки, робочі зони, маршрути переміщення працівників, процеси пакування, обробки замовлень тощо [34]. Це особливо корисно при проектуванні нових виробничих ліній або модернізації наявних — оскільки дозволяє виявити можливі колізії, перевірити доцільність змін, оцінити ергономіку і безпеку.

3D-моделювання активно впроваджується в різних галузях промисловості. 3D-ресурси в моделюванні відіграють критично важливу роль на всіх етапах життєвого циклу систем — від проектування до експлуатації та оптимізації [11].

1. Автомобільна промисловість.

У цій сфері широко використовуються 3D-моделі для створення цифрових двійників виробничих ліній, моделювання збірних процесів, логістики комплектуючих, а також просторового планування цехів. Наприклад, компанія BMW застосовує Tecnomatix для планування виробничих процесів і візуалізації майбутніх змін на заводах. Це дозволяє зменшити час на впровадження нових моделей автомобілів і знизити витрати на переналаштування обладнання.

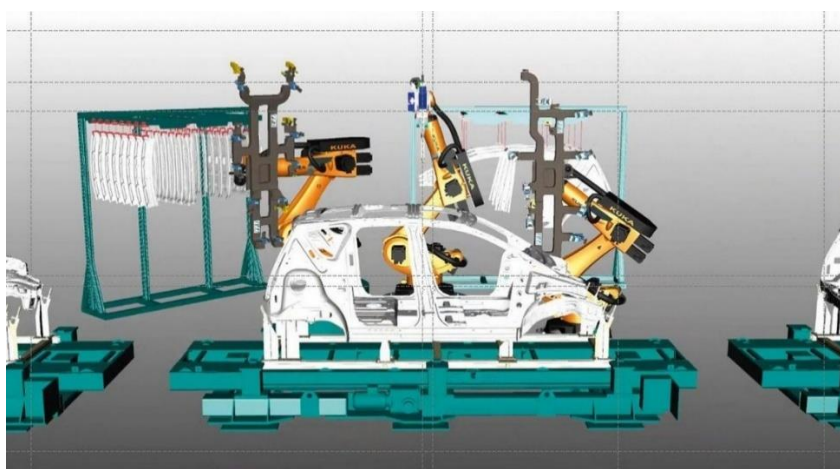


Рис. 1.3 – Приклад застосування 3-D моделювання в автомобільній промисловості

2. Аерокосмічна галузь.

У виробництві літаків, таких як проекти Airbus, 3D-моделі використовуються для візуалізації складання, перевірки ергономіки обслуговування літаків, аналізу доступу персоналу до вузлів та компонентів, симуляції логістичних маршрутів усередині виробничих зон. Це дозволяє оптимізувати процеси й уникати помилок ще на етапі проєктування.

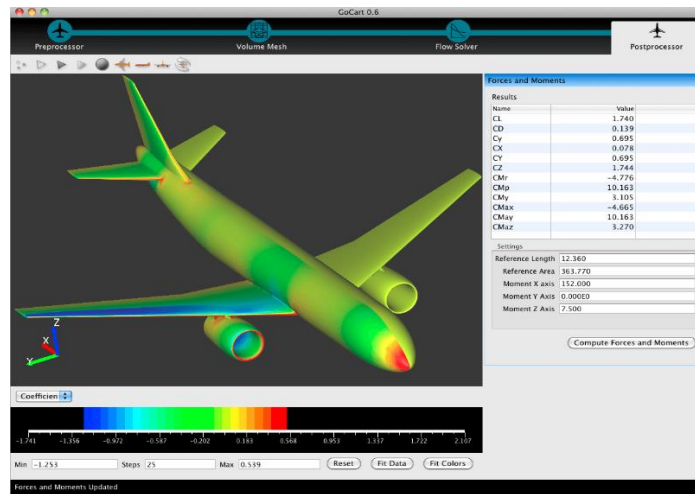


Рис. 1.4 – Приклад застосування 3-D моделювання в аерокосмічній галузі

3. Фармацевтика.

У фармацевтичному виробництві за допомогою 3D-моделей моделюють потоки продукції, логістику контейнерів, дотримання стерильності, переміщення персоналу з урахуванням гігієнічних зон. Наприклад, компанія Pfizer використовує імітаційне моделювання з 3D-ресурсами для перевірки планування чистих приміщень і логістики вакцин.

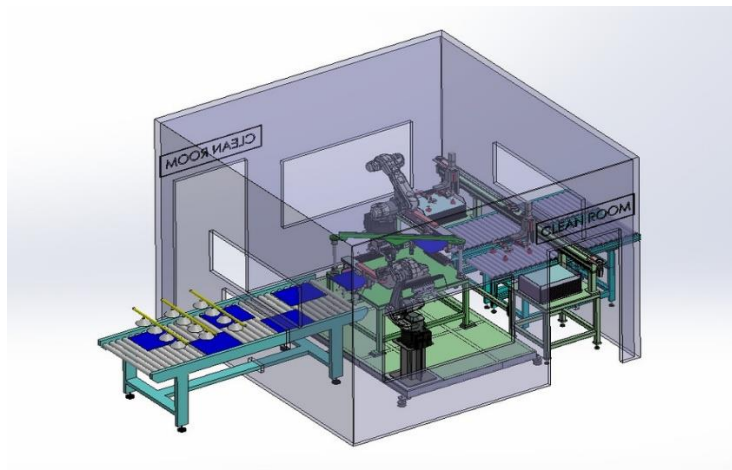


Рис. 1.5 – Приклад застосування 3-D моделювання в фармацевтиці

4. Харчова промисловість.

Тут 3D-моделі застосовуються для оптимізації пакувальних ліній, перевірки компоновки обладнання та розміщення холодильних установок. Такі системи дозволяють передбачити ситуації з простоєм, уникнути перевантаження ліній, зменшити час міжопераційного переміщення.

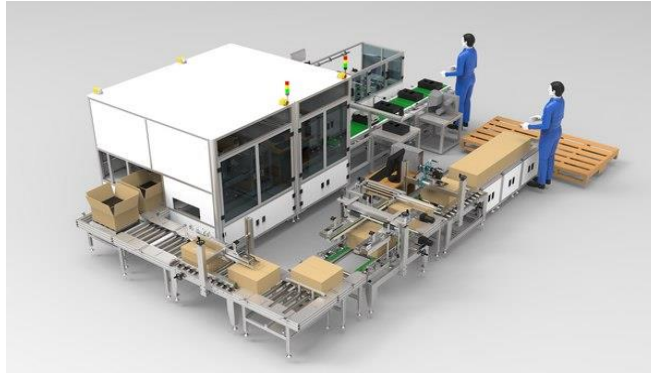


Рис. 1.6 – Приклад застосування 3-D моделювання в харчовій промисловості

5. Вантажна логістика та склади.

3D-моделювання складів (особливо з високим ступенем автоматизації) дозволяє оптимізувати розміщення стелажів, змодельовати переміщення вантажів, протестувати сценарії роботи кранів, конвеєрів або роботизованих візків. Компанії типу DHL або Amazon використовують такі моделі при розширенні логістичних хабів [37].

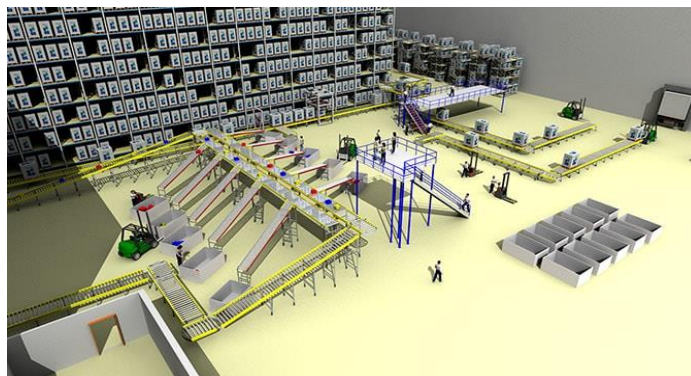


Рис. 1.7 – Приклад застосування 3-D моделювання в логістиці

6. Військова та оборонна галузь.

У цій сфері 3D-моделі використовуються для планування логістики постачання, моделювання обслуговування техніки, евакуації поранених або розміщення мобільних складів і майстерень у польових умовах.



Рис. 1.8 – Приклад застосування 3-D моделювання в військовій галузі

7. Енергетика та нафтогазова галузь.

3D-моделі трубопроводів, електростанцій, газових розподільчих станцій дозволяють моделювати аварійні сценарії, перевіряти план евакуації, оптимізувати розміщення обладнання на обмежених площах.

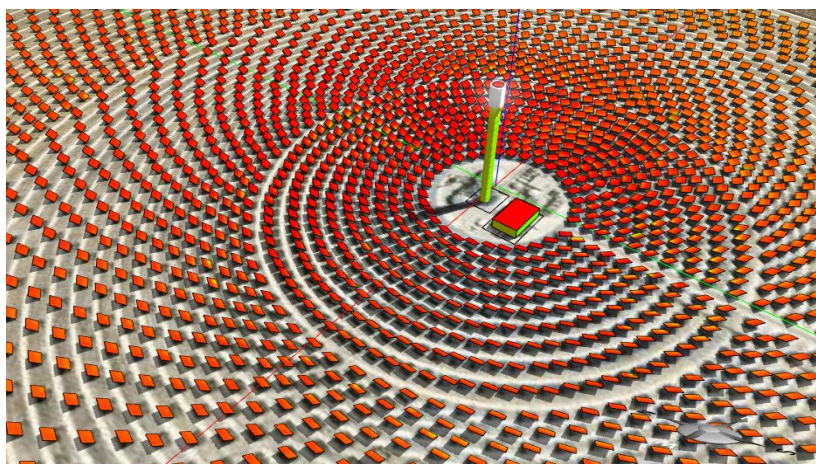


Рис. 1.9 – Приклад застосування 3-D моделювання в енергетиці

8. Муніципальне управління.

В рамках проєктів «розумного міста» застосовуються 3D-ресурси для моделювання транспортних потоків, логістики вивозу сміття, планування маршрутів громадського транспорту, проєктування зон для аварійних служб.



Рис. 1.10 – Приклад застосування 3-D моделювання в муніципальному управлінні

9. Охорона здоров'я.

Моделювання лікарень, операційних, логістики медичних засобів і ліків дозволяє зменшити час на обслуговування пацієнтів, покращити внутрішню логістику, розрахувати оптимальну кількість персоналу в різних зонах.



Рис. 1.11 – Приклад застосування 3-D моделювання в охороні здоров'я

10. Освіта та навчання.

Навчальні симулятори з 3D-моделями дозволяють студентам і працівникам вивчати процеси віртуально: це і тренажери для операторів виробничих ліній, і моделювання кризових ситуацій у логістиці (наприклад, затримка постачання), і симуляції роботи на пакувальному обладнанні.

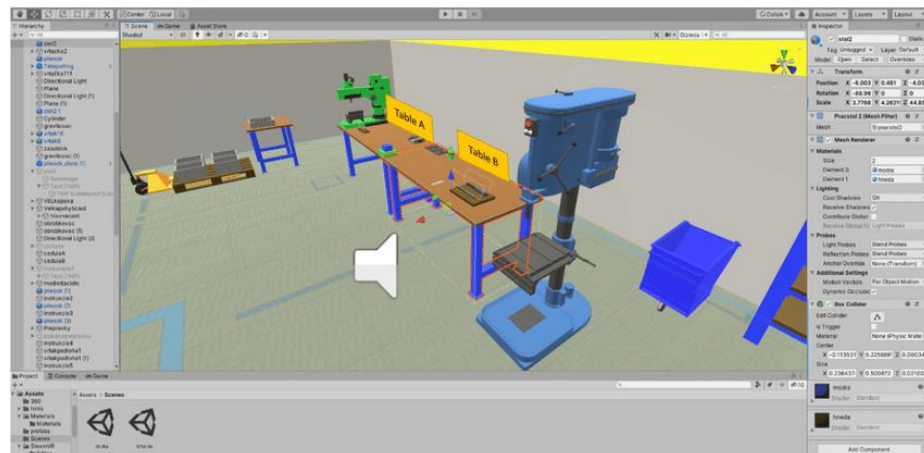


Рис. 1.12 – Приклад застосування 3-D моделювання в освіті

Принципи побудови 3D-моделей включають:

1. Відповідність реальному об'єкту — за розмірами, формою, функціональністю.
2. Інтеграцію з логікою процесу — кожен 3D-об'єкт виконує функції в моделі.
3. Масштабованість — можливість розширення та адаптації моделей.
4. Повторне використання — створення універсальних об'єктів для різних моделей.

Серед переваг 3D-моделювання можна відзначити:

- Полегшення верифікації та валідації моделей.
- Краще розуміння моделі всіма учасниками проєкту.
- Підвищення точності просторового планування.
- Можливість тестування сценаріїв у реальному часі.

- Ефективність у навчанні персоналу.

Серед недоліків:

- Високі вимоги до апаратного забезпечення.
- Більше часу на побудову моделей.
- Потреба в спеціальних графічних навичках.
- Можливість перенавантаження зайвою деталізацією.

Однією з ключових переваг є можливість анімованого відтворення процесів у режимі реального часу. Це забезпечує глибше розуміння динаміки системи, спрощує верифікацію моделі, полегшує пошук помилок у логіці або конфігурації. Крім того, анімація дозволяє тестувати різні сценарії (наприклад, зміну графіків, збільшення навантаження, аварійні ситуації) та оперативно аналізувати наслідки. Таким чином, 3D-ресурси не тільки візуалізують, а й посилюють функціональність моделі [2].

Ще однією перевагою є залучення технологій віртуальної (VR) або доповненої (AR) реальності. Деякі програмні середовища підтримують експорт моделей у VR-формат, що дозволяє «прогулятися» по віртуальному складу або виробництву, оцінити його з точки зору користувача. Це корисно для навчання персоналу, підготовки до запуску нових ліній, тестування змін до їх впровадження. Наприклад, за допомогою VR-окулярів можна провести симуляцію роботи пакувальної лінії, навчити працівника взаємодіяти з обладнанням ще до фактичного початку роботи [18].

Для створення 3D-ресурсів використовуються як вбудовані бібліотеки в середовищах моделювання (наприклад, стандартні 3D-об'єкти в AnyLogic), так і сторонні графічні редактори (Blender, SketchUp, Autodesk 3ds Max), які дозволяють розробляти унікальні об'єкти відповідно до реального прототипу. Після створення 3D-моделі її імпортують у симуляційне середовище у форматах .obj, .dae, .fbx, де відбувається інтеграція з логікою моделі — наприклад, прив'язка анімацій до подій, руху, взаємодії з іншими об'єктами.

Крім естетичного ефекту, використання 3D-ресурсів також має аналітичну цінність. Воно дозволяє точніше розрахувати просторові параметри,

такі як площа, об'єм, відстані між об'єктами, щільність розміщення. Це має значення при плануванні складів, розміщенні обладнання, забезпеченні норм безпеки і гігієни. Також 3D-моделі полегшують збір статистичних даних — наприклад, про переміщення, завантаження, тривалість операцій — що дозволяє проводити подальшу оптимізацію.

У практиці можна навести конкретні приклади: в одному з кейсів логістичної компанії AnyLogic дозволив створити точну 3D-модель складу, де симулювали переміщення палет і виявили неочевидне вузьке місце в зоні докування. В іншому випадку в фармацевтичному виробництві за допомогою VR-сценаріїв тренували операторів до роботи в чистих приміщеннях. У харчовій промисловості FlexSim використовувався для оптимізації пакувальних ліній та зменшення часу очікування.

Застосування 3D-ресурсів у моделюванні особливо цінне в умовах сучасного підприємства, яке функціонує в середовищі постійних змін, високої конкуренції та необхідності швидкого прийняття рішень. Такі моделі допомагають підвищити прозорість процесів, знизити ризики впровадження нових рішень, скоротити витрати на експериментальні зміни, підвищити ефективність використання простору та ресурсів. Наочно представлені моделі краще сприймаються керівництвом, інвесторами, партнерами — що важливо для захисту проєктів та презентацій результатів [32].

Отже, інтеграція 3D-ресурсів у процес імітаційного моделювання відкриває нові горизонти в аналізі та оптимізації логістичних і виробничих систем. Вона підсилює не тільки технічну, але й комунікаційну складову, наближаючи модель до реальності як з точки зору структури, так і функціональності. Це дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення, ефективніше навчати персонал і гнучко реагувати на виклики сучасного ринку.

1.3 Огляд існуючих платформ та інструментів.

У сучасному світі моделювання складних систем є невід'ємною частиною прийняття рішень, оптимізації процесів і підвищення ефективності діяльності в

різних галузях — від виробництва до охорони здоров'я. Зростаюча складність логістичних, виробничих та соціо-технічних систем потребує інструментів, які здатні точно відтворювати динаміку процесів, взаємодію між елементами та вплив зовнішніх факторів.

З цією метою було розроблено низку спеціалізованих програмних платформ, які дають змогу реалізувати різні підходи до моделювання — дискретно-подійне, системну динаміку, агентне та гібридне моделювання. Кожен інструмент має свої особливості, переваги та сфери застосування, що визначає доцільність його використання у тій чи іншій ситуації.

Особливої актуальності набувають платформи, які підтримують інтеграцію з 3D-ресурсами — це дозволяє створювати наочні моделі, максимально наближені до реального середовища, полегшує валідацію, комунікацію між учасниками проєктів і презентацію результатів. У даному підрозділі розглянуто найбільш поширені та ефективні програмні засоби для моделювання — AnyLogic, FlexSim, Arena, FlexSim, SimPy та MATLAB, а також визначено їх ключові функції, особливості та галузі використання.

AnyLogic – одне з найпотужніших і універсальних програмних середовищ для імітаційного моделювання, що підтримує три основні підходи: дискретно-подійне моделювання (DES) , системну динаміку (SD) та агентне моделювання (ABM) . Це робить його унікальним в порівнянні з іншими інструментами, які зазвичай орієнтовані лише на один із цих методів [14].

Можливості AnyLogic:

- Підтримка мультипарадигменного моделювання — можливість поєднувати різні підходи для більш точного представлення складних систем.
- Гнучкість та масштабованість — застосовується для моделювання процесів різного масштабу, від невеликих виробничих ліній до складних міських систем.
- Вбудовані 3D-візуалізація та анімація — дозволяє створювати наочні моделі з реалістичною графікою.

- Інтеграція із зовнішніми інструментами – підтримує взаємодію з базами даних, мовами програмування (Java , Python) та системами машинного навчання.
- Хмарні обчислення та віддалений доступ – дозволяє запускати моделі у хмарі та ділитися ними через веб-інтерфейс.

Ключові функції:

1. Гібридне моделювання – можливість поєднувати DES, SD та ABM в одній моделі.
2. Підтримка Java – дозволяє додавати власний код та розширювати функціональність.
3. Імпорт та експорт даних – взаємодія з Excel, SQL, JSON та іншими форматами даних.
4. Мережеві та розраховані на багато користувачів симуляції – дозволяє моделювати взаємодію агентів і розподілені системи.
5. Оптимізаційні алгоритми – можливість проводити аналіз сценаріїв, оцінювати ризики та знаходити найкращі рішення.

Приклади застосування:

- Промисловість та виробництво: оптимізація логістичних ланцюжків, керування складськими запасами, моделювання виробничих ліній.
- Міське планування: моделювання транспортних потоків, аналіз густини забудови, управління міськими ресурсами.
- Охорона здоров'я: аналіз роботи лікарень, моделювання поширення захворювань, оптимізація медичних послуг.
- Транспорт та логістика: управління перевезеннями, моделювання руху транспортних засобів, аналіз ефективності маршрутів.
- Фінанси та страхування: аналіз фінансових ризиків, моделювання інвестиційних стратегій, прогнозування ринкових змін.

AnyLogic – потужний інструмент, який дозволяє розробляти складні імітаційні моделі з високим ступенем деталізації. Завдяки підтримці гібридного

моделювання та інтеграції з різними джерелами даних, AnyLogic активно використовується в науці, бізнесі та промисловості [41].



Рис. 1.13 – AnyLogic

FlexSim – це сучасне програмне забезпечення для імітаційного моделювання, призначене для аналізу та оптимізації виробничих, логістичних та сервісних процесів. Використовує метод дискретно-подійного моделювання (DES), що дозволяє детально відображати події та взаємодії в системах, надаючи точні дані для аналізу і прийняття рішень [33]. FlexSim широко застосовується в різних галузях завдяки зручному інтерфейсу, потужному функціоналу та реалістичній 3D-візуалізації.

Можливості FlexSim:

- 3D - візуалізація – створення реалістичних моделей процесів із візуальним уявленням руху об'єктів.
- Підтримка дискретно-подійного та гібридного моделювання – моделювання систем з різними типами подій.
- Гнучкість інтеграції – можливість роботи із зовнішніми базами даних, імпорт/експорт даних в Excel, SQL та інші формати.
- Візуальне налагодження та аналіз – інструменти аналізу вузьких місць, симуляція різних сценаріїв.

- Оптимізація процесів – вбудовані алгоритми для пошуку оптимальних рішень в рамках системи, що моделюється.

Ключові функції:

1. Графічний інтерфейс – інтуїтивний drag-and-drop редактор для створення моделей без програмування.
2. Анімація та візуалізація – динамічне представлення процесів із можливістю налаштування деталей.
3. Статистичний аналіз – збирання та обробка даних для аналізу ефективності роботи системи.
4. Гнучкість у моделюванні – можливість роботи з різними типами процесів, включаючи виробничі та логістичні.
5. Підтримка VR (віртуальної реальності) – можливість моделювання та аналізу процесів у віртуальному просторі.

Приклади застосування:

- Виробництво: оптимізація виробничих ліній, зменшення часу простоїв обладнання, балансування робочих потоків.
- Логістика та складське господарство: поліпшення управління запасами, аналіз руху товарів, оптимізація роботи складів.
- Охорона здоров'я: планування потоків пацієнтів у лікарнях, оптимізація розкладу лікарів, моделювання роботи операційних.
- Транспорт та дистрибуція: аналіз руху транспортних потоків, планування маршрутів доставки, керування транспортними вузлами.

FlexSim – потужний інструмент для імітаційного моделювання, який поєднує реалістичну 3D-візуалізацію, інтуїтивний інтерфейс і багатий функціонал. Завдяки широким можливостям інтеграції та аналітики він активно застосовується у промисловості, логістиці та інших сферах для покращення ефективності процесів.



Рис. 1.15 – FlexSim

Tecnomatix Plant Simulation – це потужне програмне середовище для дискретно-подійного (DES) та 3D-моделювання, яке активно використовується в промисловості для оптимізації виробничих і логістичних процесів [22]. Вона дозволяє створювати цифрові двійники та точні віртуальні моделі підприємств, що значно покращує процеси планування, аналізу і прийняття рішень.

Можливості Tecnomatix Plant Simulation:

- 3D-моделювання та візуалізація – створення віртуальних моделей виробничих процесів з високою деталізацією.
- Оптимізація процесів – аналіз і покращення логістики, виробничих ліній, потоків матеріалів.
- Цифрові двійники – створення віртуальних аналогів підприємств для тестування змін перед їх впровадженням.
- Моделювання складних систем – підтримка інтеграції з іншими системами для комплексного аналізу та планування.
- Інтерфейс для аналізу результатів – зручні інструменти для виведення і аналізу результатів симуляції.

Ключові функції:

1. Цифрові двійники – Tecnomatix дозволяє створювати віртуальні копії реальних виробничих процесів, що дозволяє проводити їх детальне тестування та оптимізацію в безпечному середовищі.
2. Інтеграція з ERP та MES – платформа підтримує інтеграцію з системами управління ресурсами (ERP) та виконанням виробничих завдань (MES),

що дозволяє здійснювати більш точний моніторинг та управління виробничими процесами.

3. Покращення планування і розміщення – Tescnomatix дозволяє проектувати та оптимізувати планування цехів, складів та інших виробничих одиниць для максимального використання наявних ресурсів і зниження простоїв.
4. Автоматизоване планування виробництва – програма дозволяє оптимізувати лінії виробництва, враховуючи можливі зміни в обсягах виробництва або зміни в інфраструктурі.
5. Аналіз ефективності – забезпечує моделювання сценаріїв для оцінки ефективності змін, які можуть бути впроваджені в процеси виробництва або логістики.

Приклади застосування:

- Автомобільна промисловість: Tescnomatix активно використовується для оптимізації виробничих ліній автомобільних заводів, наприклад, у BMW, для планування та візуалізації майбутніх змін на заводах.
- Машинобудівна промисловість: використовується для створення цифрових двійників виробничих ліній і автоматизованих складських систем. Це дозволяє максимально знизити витрати на виробництво та збільшити швидкість виготовлення продукції.
- Логістика: Tescnomatix застосовується для моделювання складських і логістичних процесів, оптимізації руху матеріалів, розміщення вантажу на складах і управління запасами.
- Харчова промисловість: моделювання конвеєрних ліній, автоматизація процесів обробки і пакування продуктів.
- Фармацевтика: використовується для оптимізації процесів пакування та зберігання медикаментів, а також для виявлення можливих зон для покращення якості виробництва.

Tescnomatix Plant Simulation є одним з лідерів у своєму сегменті завдяки своїм потужним можливостям 3D-моделювання та інтеграції з іншими

системами, що робить її ідеальним вибором для складних і масштабованих виробничих і логістичних процесів.



Рис. 1.16 – Tecnomatix Plant Simulation

Visual Components – це потужне програмне забезпечення для 3D-моделювання та симуляції, яке спеціалізується на оптимізації виробничих та логістичних процесів. Використовує методи дискретно-подійного моделювання (DES) для відображення складних систем і процесів у реальному часі. Цей інструмент дозволяє створювати високоякісні 3D-моделі для візуалізації і аналізу виробничих та логістичних процесів, допомагаючи у тестуванні варіантів змін перед їх впровадженням у реальному середовищі [24].

Можливості Visual Components:

- 3D-моделювання та візуалізація – високоякісні 3D-моделі для відображення складних виробничих та логістичних систем.
- Оптимізація процесів – допомагає у плануванні та покращенні ефективності ланцюгів поставок, виробничих ліній та складських операцій.
- Цифрові двійники – створення віртуальних копій виробничих середовищ для тестування нових рішень і планів.
- Інтерфейс для інтеграції з іншими системами – підтримка підключення до різних ПЗ і баз даних для гнучкого аналізу та моделювання.

- Підтримка сценаріїв – можливість створення різних сценаріїв для аналізу впливу змін в системах.

Ключові функції:

1. 3D-візуалізація – надання реалістичних 3D-моделей для точнішого вивчення і прийняття рішень.
2. Моделювання потоків матеріалів – оптимізація та перевірка варіантів руху матеріалів та готової продукції.
3. Інтерактивний інтерфейс – можливість безпосередньо взаємодіяти з моделями через графічний інтерфейс.
4. Моделювання віртуальних підприємств – створення цифрових двійників для тестування виробничих та логістичних процесів.
5. Інтеграція з CAD та ERP системами – можливість імпортувати і експортувати дані з інших промислових систем.

Приклади застосування:

- Промисловість та виробництво: оптимізація виробничих ліній, тестування варіантів розміщення обладнання, моделювання потоків матеріалів.
- Логістика: планування та оптимізація складських приміщень, перевезення вантажів, маршрутизація.
- Автомобільна промисловість: створення цифрових двійників для тестування виробничих і складських операцій.
- Медична індустрія: моделювання внутрішньої логістики медичних установ, оптимізація потоків пацієнтів і медичних матеріалів.
- Освітні установи: симуляція навчальних процесів та оптимізація ресурсів у навчальних закладах.

Visual Components є потужним інструментом для промислових і логістичних компаній, а також для будь-яких підприємств, де важливо точно відобразити і оптимізувати процеси за допомогою 3D-моделювання. Це дозволяє значно підвищити ефективність планування, знизити витрати та покращити процеси прийняття рішень.



Рис. 1.17 – Visual Components

Witness Horizon – це потужне програмне забезпечення для імітаційного моделювання, яке підтримує дискретно-подійне моделювання (DES) та 3D-моделювання [27]. Воно дозволяє користувачам створювати цифрові двійники виробничих і логістичних процесів, а також аналізувати та оптимізувати їх. Це спеціалізоване програмне забезпечення для моделювання в реальному часі, яке активно використовується в різних галузях для прийняття ефективних рішень.

Можливості Witness Horizon:

- 3D-візуалізація – підтримка реалістичних 3D-моделей для аналізу та візуалізації складних процесів.
- Гнучкість моделювання – можливість моделювати широкий спектр систем, від виробничих процесів до логістичних ланцюгів.
- Інтерактивність – підтримка реального часу та можливість маніпулювати моделями під час симуляцій.
- Оптимізація – інструменти для аналізу і пошуку оптимальних рішень, зокрема для підвищення ефективності та зниження витрат.
- Інтеграція з іншими системами – можливість імпорту даних з різних джерел, таких як ERP-системи, та експорту результатів для подальшого аналізу.

Ключові функції:

1. 3D-візуалізація та анімація – створення реалістичних 3D-моделей для демонстрації і аналізу систем.

2. Гнучке налаштування ресурсів – підтримка налаштувань для різних видів ресурсів, таких як машини, робітники, транспорт.
3. Розширене моделювання потоків – здатність моделювати як окремі етапи, так і цілі виробничі та логістичні системи.
4. Аналітика та оптимізація – інструменти для аналізу результатів симуляцій і пошуку шляхів оптимізації процесів.
5. Моделювання у реальному часі – підтримка інтерактивного моделювання для тестування сценаріїв в реальному часі.

Приклади застосування:

- Промисловість і виробництво: оптимізація виробничих ліній, управління запасами, моделювання складських процесів.
- Логістика та транспортування: моделювання потоків товарів, управління перевезеннями та маршрутизацією.
- Управління персоналом: планування робочих змін, моделювання взаємодії між працівниками і ресурсами.
- Енергетика та телекомунікації: аналіз процесів у галузях енергетики та комунікаційних мереж.

Witness Horizon є дуже корисним для оптимізації складних процесів завдяки своїй здатності до 3D-моделювання, що дозволяє створювати точні візуальні моделі для прийняття більш обґрунтованих рішень.



Рис. 1.18 – Witness Horizon

Simio – це потужне програмне забезпечення для імітаційного моделювання, яке підтримує дискретно-подійне моделювання (DES) та 3D-моделювання. Simio дозволяє створювати високодеталізовані моделі для оптимізації різноманітних процесів у виробництві, логістиці та інших галузях. Завдяки гнучкому інтерфейсу, розширеним функціям та можливостям для інтеграції, Simio користується популярністю серед підприємств для аналізу й покращення їхніх операцій.

Можливості Simio:

- Підтримка гнучкого моделювання – можливість поєднувати різні моделі для більш точного відображення складних систем.
- Розширена 3D-візуалізація – створення наочних візуалізацій і анімацій процесів.
- Інтерактивні моделі – підтримка інтерактивних візуалізацій для відображення результатів симуляції в реальному часі.
- Вбудовані оптимізаційні інструменти – підтримка оптимізації моделей для покращення ефективності.
- Підтримка хмарних обчислень – можливість запускати моделі в хмарі, що дозволяє обробляти великі дані й забезпечує віддалений доступ.

Ключові функції:

1. Гнучкість у моделюванні – можливість створювати детальні моделі з різними рівнями складності.
2. Підтримка 3D-візуалізації – реалістичні графічні відображення та анімація процесів.
3. Аналіз сценаріїв та оптимізація – можливість оцінювати різні сценарії та знаходити оптимальні рішення.
4. Інтеграція з іншими системами – підтримка імпорту та експорту даних з іншими програмними засобами та базами даних.
5. Мережеві симуляції – можливість створення моделей для багатьох користувачів для аналізу складних взаємодій.

Приклади застосування:

- Промисловість та виробництво: оптимізація виробничих ліній, планування ресурсів, управління запасами.
- Логістика та транспортування: моделювання руху транспорту, управління вантажними перевезеннями, оптимізація логістичних ланцюгів.
- Охорона здоров'я: покращення ефективності медичних процесів, аналіз потоків пацієнтів, планування роботи лікарень.
- Освіта та навчання: створення моделей для навчальних цілей, аналіз навчальних процесів.

Simio — це універсальний інструмент для побудови складних моделей з високим рівнем деталізації та можливістю інтеграції з іншими програмними засобами [29]. Завдяки своїм функціям і можливостям для оптимізації, Simio активно використовується у різних галузях для підвищення ефективності операцій та управління процесами.

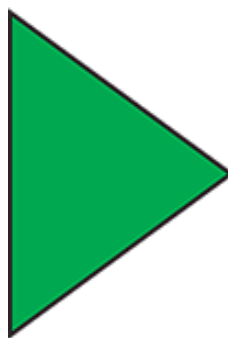


Рис. 1.19 – Simio

Огляд існуючих платформ та інструментів для імітаційного моделювання демонструє різноманіття підходів та можливостей, що надаються для вирішення складних задач в різних галузях. Сучасні програмні середовища для моделювання дозволяють ефективно відтворювати та аналізувати складні

системи, підтримуючи різноманітні методи, такі як дискретно-подійне моделювання, системну динаміку та агентне моделювання.

Кожна з платформ пропонує унікальний набір функцій, які відповідають вимогам конкретних галузей і завдань, дозволяючи проводити оптимізацію, прогнозування та аналіз ефективності різних процесів. Однак, незважаючи на різноманітність інструментів, важливими залишаються загальні тенденції: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, підтримка високої деталізації моделей, гнучкість у налаштуванні сценаріїв, інтеграція з іншими системами та доступ до потужних аналітичних можливостей.

Загалом, вибір програмного забезпечення залежить від конкретних вимог до моделювання, наявних ресурсів і масштабу завдань, що ставляться. Інструменти для імітаційного моделювання забезпечують широкий спектр функціональних можливостей, що дозволяють приймати обґрунтовані рішення, оптимізувати бізнес-процеси та ефективно управляти складними системами.

Висновки до розділу 1.

У першому розділі розглянуто основні види імітаційного моделювання – дискретно-подієве, агентне та системну динаміку – та особливості їх використання у виробничих системах.

Проаналізовано переваги застосування 3D-ресурсів, зокрема підвищення наочності моделей, полегшення верифікації та покращення взаємодії з користувачем.

Також розглянуто застосування 3D-моделювання в різних галузях, що підтверджує його широкі можливості та ефективність у візуалізації складних систем і процесів.

Проведено огляд популярних середовищ моделювання (AnyLogic, FlexSim, Tecnomatix та ін.) з акцентом на їх функціональні можливості при роботі з 3D-візуалізацією.

Отримані результати є основою для подальшого вибору інструментів та побудови моделі складського приміщення.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ЦИФРОВИХ ФОРМАТІВ 3D – МОДЕЛЕЙ

2.1 Аналіз середовищ розробки імітаційних моделей із застосуванням 3D – ресурсів.

Імітаційне моделювання є потужним інструментом для аналізу та оптимізації складних систем, а використання 3D-ресурсів значно підвищує ефективність таких моделей. Застосування тривимірної графіки дозволяє створювати наочні та детальні візуалізації, що допомагають краще розуміти процеси, їх взаємодію та впливи в реальному часі. Це дає змогу не лише моделювати фізичні аспекти системи, а й аналізувати її поведінку в умовах змін та сценаріїв, що імітують реальні ситуації.

Інтеграція 3D-ресурсів у середовища розробки імітаційних моделей відкриває нові можливості для вивчення складних динамічних систем. Візуалізація процесів допомагає спростити взаємодію між користувачем і моделлю, дозволяючи оцінювати результативність рішень, прогнозувати ефективність різних сценаріїв та покращувати загальне управління процесами. Окрім того, тривимірні моделі допомагають детально відтворювати реальні ситуації, що є критично важливим у таких сферах, як виробництво, логістика, транспорт, міське планування, охорона здоров'я та інші.

У цьому підрозділі буде здійснено більш поглиблений аналіз основних середовищ розробки, які використовують 3D-ресурси для імітаційного моделювання, з фокусом на їхні можливості, переваги та обмеження.

При виборі середовища розробки імітаційних моделей з використанням 3D-ресурсів важливо враховувати низку ключових характеристик, які визначають ефективність та зручність роботи в системі:

- Графічні можливості – підтримка 3D-моделей, фізичних симуляцій, анімацій, реалістичність рендерингу та візуалізація складних процесів.

- Підтримка імітаційних методів – реалізація дискретно-подійного моделювання (DES), системної динаміки (SD) та агентного моделювання (ABM).
- Інструменти розробки – наявність вбудованих засобів програмування, підтримка скриптових мов та API для розширення функціональності.
- Інтеграція із зовнішніми системами – можливість взаємодії з базами даних, зовнішніми обчислювальними модулями, підтримка хмарних сервісів та обміну даними.
- Продуктивність – здатність ефективно обробляти великі та складні моделі у реальному або прискореному часі.
- Зручність використання – доступність графічного інтерфейсу, навчальних матеріалів, шаблонів і прикладів, що полегшують процес розробки.

Далі розглянемо, як ці характеристики реалізуються в найпоширеніших середовищах моделювання з підтримкою 3D.

1. AnyLogic.

Графічні можливості:

AnyLogic підтримує 3D-візуалізацію процесів, що дозволяє створювати анімовані моделі з реалістичною графікою. Інтерфейс дозволяє додавати просторові об'єкти, переміщення агентів у 3D-просторі та взаємодію між ними. Візуалізація інтегрована безпосередньо в середовище моделювання.

Підтримка імітаційних методів:

AnyLogic є мультипарадигменним середовищем і підтримує три основні підходи моделювання: дискретно-подійне моделювання (DES), системну динаміку (SD) та агентне моделювання (ABM). Крім того, їх можна поєднувати в одній моделі для досягнення більшої точності.

Інструменти розробки:

Середовище підтримує мову Java, що дозволяє розширювати функціональність моделей через користувацький код. Є вбудований редактор коду, підтримка об'єктно-орієнтованого підходу, шаблонів та бібліотек. Також доступні засоби налагодження та логування.

Інтеграція із зовнішніми системами:

AnyLogic дозволяє інтегрувати моделі з базами даних (SQL, Excel), використовувати веб-сервіси, обмінюватися даними у форматах CSV, XML, JSON. Підтримується взаємодія з мовами Python, R, MATLAB, а також з машинним навчанням та хмарними платформами.

Продуктивність:

Продуктивність AnyLogic залежить від складності моделі, однак завдяки підтримці багатопоточності та можливості запуску в хмарі, моделі можуть ефективно масштабуватись для обробки великих обчислень. Платформа також підтримує розподілені симуляції.

Зручність використання:

AnyLogic має зручний інтерфейс з можливістю перетягування елементів, наявність численних прикладів, шаблонів, документації та інтерактивних підказок. Вбудовані навчальні матеріали та активна спільнота підтримують нових користувачів.

Переваги:

- Мультипарадигмовість – підтримка трьох типів моделювання (DES, SD, ABM) в одному середовищі.
- Гнучкість – підходить як для простих, так і для надскладних систем.
- Інтеграція з Java та Python – можливість розширення функціоналу власним кодом.
- 3D-візуалізація – реалістична анімація для демонстрації роботи моделей.
- Хмарні сервіси та Web-інтерфейс – зручний доступ до моделей, обмін та запуск через інтернет.
- Розвинуті інструменти збору та аналізу даних – імпорт/експорт із баз даних, підтримка різних форматів.

Недоліки:

- Висока складність освоєння – потребує часу на вивчення, особливо без досвіду в програмуванні.
- Вартість ліцензії – безкоштовна версія обмежена за функціоналом.

- Високі вимоги до ресурсів системи – при складних моделях потрібен потужний ПК.

2. FlexSim.

Графічні можливості:

FlexSim забезпечує повноцінну 3D-візуалізацію моделей з високим рівнем реалістичності. У середовищі можна створювати об'єкти з анімацією, фізичними властивостями та просторовим розміщенням. Інтерфейс підтримує drag-and-drop, а також можливість імпорту 3D-ресурсів.

Підтримка імітаційних методів:

Основний метод, який підтримує FlexSim — це дискретно-подійне моделювання (DES). Моделі будуються на основі подій, черг, ресурсів та об'єктів, що взаємодіють між собою. Агентне або гібридне моделювання реалізується меншою мірою, через сценарії або за допомогою додаткового коду [21].

Інструменти розробки:

FlexSim має вбудовану мову FlexScript (засновану на C++), яку можна використовувати для написання користувацької логіки. Також підтримуються блок-схеми, шаблони процесів, параметризація та система модульного проектування. Є можливість роботи зі змінними, масивами, статистичними функціями.

Інтеграція із зовнішніми системами:

Середовище підтримує імпорт/експорт даних з Excel, баз даних, JSON, XML. Є можливість обміну даними через API, взаємодії з OPC-серверами та MES-системами. Також підтримується інтеграція зі сторонніми CAD-системами та ERP.

Продуктивність:

FlexSim здатен обробляти великі моделі з високою швидкістю завдяки оптимізованому ядру симуляції. Підтримується багатопоточність, паралельне обчислення та 64-бітна архітектура, що дозволяє ефективно масштабувати моделі під більш складні системи.

Зручність використання:

FlexSim має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс з великою кількістю візуальних елементів. Доступна інтерактивна довідка, навчальні курси, відеоуроки та активна онлайн-спільнота. Для початківців реалізовані шаблони типових процесів та модулів.

Переваги:

- 3D-візуалізація – потужні інструменти для створення реалістичних 3D-моделей і візуалізації процесів.
- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс – зручний графічний інтерфейс, що полегшує створення моделей без необхідності глибоких знань програмування.
- Підтримка кастомізації – можливість створення власних елементів і алгоритмів через скрипти.
- Висока продуктивність – здатність ефективно обробляти складні моделі та сценарії.
- Потужні аналітичні інструменти – дозволяє проводити аналіз ефективності різних варіантів сценаріїв.

Недоліки:

- Висока вартість ліцензії – ліцензія для повного доступу до можливостей платформи є дорогою.
- Обмежена підтримка методів – фокусується на дискретно-подійному моделюванні, інші методи можуть бути реалізовані з обмеженнями.
- Складність у налаштуванні складних моделей – для реалізації складних систем може знадобитись глибоке розуміння програмування.

3. Tecnomatix Plant Simulation.

Графічні можливості:

Tecnomatix Plant Simulation надає широкі можливості для 3D-візуалізації виробничих процесів і логістичних систем. Вбудований 3D-двигунок дозволяє створювати реалістичні моделі виробничих цехів із точним просторовим

розташуванням об'єктів. Є підтримка анімації та імпорту 3D-моделей із CAD-систем (наприклад, Siemens NX).

Підтримка імітаційних методів:

Основним методом моделювання є дискретно-подійне моделювання (DES). Plant Simulation дозволяє моделювати виробничі та логістичні процеси з урахуванням часу, черг, затримок і ресурсів. Існує також підтримка елементів агентного підходу через використання модульних компонентів із логікою поведінки.

Інструменти розробки:

Середовище має власну мову програмування SimTalk, яка використовується для розширення логіки моделей. Програму також підтримує створення користувацьких бібліотек, шаблонів, макросів та модульного структурування моделі. Інтерфейс дозволяє працювати як у 2D, так і в 3D режимі.

Інтеграція із зовнішніми системами:

Plant Simulation легко інтегрується з системами управління підприємствами (ERP, MES), CAD/PDM-системами, базами даних (SQL, Excel, XML), а також з інженерними платформами Siemens. Підтримується зв'язок через OPC, API та зовнішні скрипти.

Продуктивність:

Висока продуктивність забезпечується завдяки багатопоточній обробці, можливості розрахунків у фоновому режимі та оптимізації моделей. Plant Simulation ефективно працює навіть із великими і складними виробничими системами, завдяки внутрішнім алгоритмам оптимізації ресурсів.

Зручність використання:

Програма має потужний, хоч і дещо технічний інтерфейс, що орієнтований на інженерів. Наявні готові бібліотеки стандартних виробничих об'єктів, велика кількість навчальних матеріалів, документація та приклади моделей. Підтримується багатомовність і інтеграція з навчальними платформами Siemens.

Переваги:

- 3D-візуалізація – підтримка створення реалістичних 3D-моделей, що дозволяє детально зображати виробничі процеси.
- Гнучкість і масштабованість – можливість моделювання систем різного масштабу, від малих виробничих ліній до великих заводських комплексів.
- Інтеграція з іншими інструментами – можливість підключення до різних CAD/CAM систем та ПЛК для полегшення автоматизації процесів.
- Потужні аналітичні функції – розширені інструменти для оцінки ефективності процесів і прогнозування на основі моделі.
- Підтримка системного та дискретно-подійного моделювання – дозволяє створювати моделі як для виробничих, так і для логістичних процесів.

Недоліки:

- Складний інтерфейс – високий рівень складності інтерфейсу, що потребує значних зусиль для освоєння.
- Висока вартість – ліцензія та повний набір інструментів є дорогими.
- Не надто сильна підтримка інших методів моделювання – основний акцент на дискретно-подійному моделюванні, з обмеженнями в інших парадигмах.

4. Visual Components.

Графічні можливості:

Visual Components має один із найпотужніших графічних рушіїв серед програм 3D-моделювання виробничих процесів. Платформа підтримує високоякісну 3D-візуалізацію з анімацією, колізійною перевіркою, фізикою руху та реалістичним рендерингом. Доступна велика бібліотека готових 3D-компонентів (роботи, конвеєри, датчики тощо), які можна легко комбінувати у віртуальному середовищі.

Підтримка імітаційних методів:

Основний метод – дискретно-подійне моделювання (DES). Платформа дозволяє точно моделювати логіку роботи виробничих систем, зокрема рух об'єктів, взаємодію між машинами та ресурсами. Агентні або системно-

динамічні підходи не є основною функціональністю, але базові концепти можна реалізувати через поведінкове програмування компонентів.

Інструменти розробки:

Visual Components підтримує Python як основну мову скриптів для розширення функціоналу компонентів та налаштування логіки. Програма має модульну архітектуру, що дозволяє створювати власні бібліотеки об'єктів. Інтерфейс зручний і орієнтований на інтерактивну побудову моделей за допомогою drag-and-drop.

Інтеграція із зовнішніми системами:

Програма має API для взаємодії з іншими системами (MES, ERP), а також можливість підключення зовнішніх баз даних і використання зовнішніх скриптів. Існує підтримка імпорту CAD-файлів (STEP, IGES, SolidWorks, Inventor тощо), а також інтеграція з інструментами віртуальної реальності (VR) для повного занурення у віртуальне виробництво.

Продуктивність:

Visual Components оптимізований для роботи з великими 3D-моделями. Вбудовані механізми кешування та оптимізації дозволяють забезпечити стабільну роботу навіть на складних симуляціях із великою кількістю об'єктів. Є підтримка GPU-прискорення для візуалізації.

Зручність використання:

Інтерфейс інтуїтивно зрозумілий, із підтримкою drag-and-drop, що особливо зручно для інженерів і технологів. Наявні докладні туторіали, документація, навчальні відео, а також активна спільнота користувачів. Можна працювати у 3D-середовищі без необхідності писати код – для більшості завдань вистачає графічного інтерфейсу.

Переваги:

- Потужні 3D-візуалізаційні можливості – надає можливість створювати деталізовані 3D-моделі для візуалізації виробничих і логістичних процесів.

- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс – легкий у використанні інтерфейс, що дозволяє швидко освоїти програму без глибоких технічних знань.
- Гнучкість у розширеннях – підтримка інтеграції з іншими програмами, зокрема через API, що дозволяє легко налаштовувати інструмент під специфічні вимоги.
- Підтримка багатьох моделювальних підходів – можливість застосовувати різні типи моделювання для оптимізації процесів у різних сферах.
- Моделювання виробничих і складських процесів – спеціалізація на моделюванні саме цих процесів дозволяє забезпечити високу точність у прогнозуванні.

Недоліки:

- Обмежена підтримка складних аналітичних функцій – на відміну від деяких конкурентів, у Visual Components обмежена кількість аналітичних інструментів для глибокого аналізу.
- Обмежена підтримка не 3D-рішення – програма здебільшого орієнтована на 3D, а для 2D-моделювання можливості можуть бути недостатніми.
- Висока вартість – ліцензії є дорогими, що може бути перешкодою для малих компаній або індивідуальних користувачів.

5. Witness Horizon.

Графічні можливості:

Witness Horizon підтримує як 2D-, так і 3D-візуалізацію, при цьому 3D-режим дозволяє створювати реалістичні моделі виробничих систем з візуальним представленням ресурсів, потоку об'єктів, стану обладнання. Є можливість анімації процесів, деталізації рухів та візуалізації статистичних показників у режимі реального часу. Візуалізація менш деталізована, ніж у Visual Components чи FlexSim, однак достатня для наочного аналізу.

Підтримка імітаційних методів:

Основний метод – дискретно-подійне моделювання (DES), з елементами логічного моделювання та подієвого контролю. Система дозволяє будувати точні моделі роботи підприємств з урахуванням черг, простоїв, обслуговування,

технічного персоналу тощо. Підтримка інших підходів (SD, ABM) обмежена або реалізується через додаткове програмування.

Інструменти розробки:

Witness використовує власну мову моделювання з можливістю додавання логіки через скрипти. Є візуальний редактор блоків і подій, конфігуратор ресурсів, планувальник подій і редактор експериментів. Інструменти аналізу доступні прямо в середовищі моделювання, включаючи побудову графіків і звітів.

Інтеграція із зовнішніми системами:

Програма дозволяє імпортувати/експортувати дані з Excel, баз даних, ERP-систем. Підтримується ODBC-з'єднання. Є можливість інтеграції з зовнішніми модулями та розширенням функціоналу через API.

Продуктивність:

Witness Horizon здатний ефективно обробляти моделі середнього та великого масштабу. Оптимізація симуляцій забезпечується завдяки побудові подієвих черг та розумному використанню системних ресурсів. 3D-візуалізація незначно впливає на продуктивність, оскільки не є надто ресурсомісткою.

Зручність використання:

Програма має зручний інтерфейс, хоча крива навчання трохи вища через власну мову скриптів. Присутні навчальні матеріали, документація, офіційна технічна підтримка, а також навчальні курси від розробників. Середовище підходить як для новачків, так і для досвідчених аналітиків.

Переваги:

- Висока деталізація 3D-візуалізації – програма надає можливість створювати реалістичні 3D-моделі для відображення виробничих процесів та складських систем.
- Гнучка система аналізу та оптимізації – має потужні інструменти для аналізу результатів моделювання, що дозволяють здійснювати комплексну оптимізацію.

- Можливості для багатопарадигменного моделювання – підтримує різні підходи до моделювання, що дозволяє розробляти моделі різної складності та масштабу.
- Інтеграція з іншими системами та даними – надає можливість підключення до зовнішніх баз даних, ERP-систем, що робить її ідеальним інструментом для інтеграції в корпоративне середовище.
- Масштабованість – здатна моделювати як маленькі, так і великі виробничі системи, зокрема в умовах складних логістичних мереж.

Недоліки:

- Висока вартість – ліцензії для використання Witness Horizon можуть бути дорогими, що може обмежувати доступ до програми для малих підприємств або окремих користувачів.
- Складний інтерфейс для новачків – хоча програма потужна, її інтерфейс може бути складним для початківців, що вимагає часу для освоєння.
- Обмежена підтримка 2D-моделювання – програма здебільшого орієнтована на 3D, і для тих, хто шукає інструмент для простих 2D-моделей, вона може бути занадто складною.

6. Simio.

Графічні можливості:

Simio підтримує повноцінне 3D-моделювання «з коробки», дозволяючи створювати реалістичні візуалізації об'єктів, процесів і середовища. Використовуються анімовані 3D-моделі, які можуть імпортуватися або створюватися вручну. Всі процеси анімовано синхронізовано з симуляційною логікою, що дозволяє легко візуалізувати та перевіряти моделі.

Підтримка імітаційних методів:

Основний метод – дискретно-подійне моделювання (DES), з підтримкою елементів об'єктно-орієнтованого та агентного підходів. Simio реалізує концепцію об'єктно-орієнтованого моделювання, де кожен компонент є окремим об'єктом з поведінкою. Системна динаміка не підтримується безпосередньо, але базові елементи можна реалізувати вручну.

Інструменти розробки:

Моделі створюються через графічний інтерфейс із можливістю використання логіки за допомогою властивостей, процесів і правил. Власна мова моделювання не потрібна — більшість сценаріїв створюється через діаграми. Для розширеної логіки можна використовувати VB.NET (Visual Basic). Simio також має потужний експериментатор для сценарного аналізу, оптимізації та планування.

Інтеграція із зовнішніми системами:

Simio підтримує імпорт даних із Excel, Access, SQL Server та інших джерел через ODBC. Є можливість інтеграції з ERP/MES-системами. Також підтримується зв'язок з зовнішніми алгоритмами оптимізації, API, хмарною обробкою та сценаріями планування на основі календарів.

Продуктивність:

Simio добре оптимізований для виконання складних моделей, включаючи велику кількість об'єктів і подій. Висока продуктивність досягається завдяки асинхронній обробці процесів та можливості використання паралельного виконання (при запуску у хмарі або з використанням багатоядерних процесорів).

Зручність використання:

Інтерфейс орієнтований на користувача, з підтримкою drag-and-drop, візуального програмування та мінімального кодування. Документація, навчальні курси, приклади моделей, форум підтримки та відеоуроки значно спрощують процес навчання.

Переваги:

- Сучасна підтримка 3D-моделювання – Simio дозволяє створювати наочні тривимірні моделі з використанням готових об'єктів і текстур, що значно покращує візуалізацію процесів.
- Гнучка архітектура об'єктів – моделювання базується на об'єктно-орієнтованому підході, що полегшує побудову складних систем і повторне використання компонентів.

- Паралельна симуляція і планування – підтримує одночасне моделювання поточних процесів і прогнозування майбутніх сценаріїв.
- Потужна аналітика та інтеграція з даними – легко працює з Excel, SQL, і зовнішніми джерелами, дозволяючи проводити глибокий аналіз результатів.
- Хмарні обчислення та співпраця – моделі можна запускати в хмарі, а також працювати з ними спільно в команді.

Недоліки:

- Високі вимоги до ресурсів системи – складні 3D-моделі потребують потужного обладнання, що може бути обмеженням для користувачів зі слабшими ПК.
- Платність та ліцензії – як і більшість професійних рішень, Simio є комерційним продуктом з відповідною вартістю.
- Крива навчання – хоча інтерфейс досить дружній, розуміння концепцій об'єктно-орієнтованого моделювання потребує часу та практики.

Застосування 3D-візуалізації у моделюванні складських або виробничих процесів відіграє важливу роль не лише з точки зору наочності, а й для кращого розуміння динаміки системи, виявлення «вузьких місць» та потенційних оптимізацій. Середовища моделювання суттєво різняться між собою за функціональністю, зручністю побудови логіки процесів, ступенем деталізації візуальних елементів, можливістю інтеграції з іншими програмними засобами та підтримкою користувацьких скриптів.

Крім технічних характеристик, важливими чинниками при виборі програмного забезпечення є рівень навчальної кривої, наявність документації, активність спільноти користувачів, а також ліцензійна політика — зокрема, доступність безкоштовної версії з базовим функціоналом. Кожне із досліджених середовищ має свої переваги залежно від завдань, які ставляться у межах проєкту. Деякі з них більше підходять для моделювання виробничих ліній з акцентом на технічну точність, інші — забезпечують гнучкість у

створенні логіки взаємодії об'єктів і добре підходять для навчальних чи експериментальних цілей.

Таблиця 2.1 – Порівняння середовищ розробки імітаційних моделей з підтримкою 3D-візуалізації

Критерій	AnyLogic	FlexSim	Tecnomatix Plant Simulation	Visual Components	Witness Horizon	Simio
Тип моделювання	DES, SD, ABM	DES	DES	DES	DES	DES
3D-візуалізація	Вбудована, реалістична	Висока кісна	Стилізована, ефективна	Деталізована, CAD-рівень	Стилізована	Реалістична, настроювана
Підтримка програмування	Java, Python, власні функції	C++, власний скрипт	Власна мова (SimTalk)	Python, API	Власні блоки, логіка	Візуальне + C#-подібний код
Інтеграція із зовнішніми системами	SQL, Excel, JSON, ML	Excel, DB, OPC	ERP, DB, Excel	CAD, ERP, API	Excel, DB	Excel, SQL, хмара
Продуктивність	Висока (залежить від моделі)	Висока	Оптимізована для виробничих процесів	Висока при візуалізації	Висока для промислових процесів	Висока, підтримка хмарних обчислень
Зручність використання	Помірна (багато функцій)	Інтуїтивна	Складна для новачків	Зручний 3D-інтерфейс	Середня	Візуальний підхід
Ціна / ліцензування	Платна, є безкоштовна версія	Платна, демо	Комерційна	Комерційна	Комерційна	Комерційна, академічна версія

Проведений аналіз показав, що сучасні програмні середовища імітаційного моделювання з підтримкою 3D-ресурсів значно відрізняються за функціональністю, гнучкістю, доступністю та зручністю використання. Вибір конкретного інструмента залежить від поставлених завдань, типу системи, що моделюється, а також вимог до візуалізації, інтеграції з іншими системами та глибини аналізу. Середовище моделювання має не лише забезпечувати точне представлення процесів, але й бути ефективним інструментом для експериментування, дослідження й оптимізації складних систем.

2.2 Аналіз алгоритмів та методів побудови імітаційних моделей.

Ефективне моделювання складних систем потребує застосування відповідних методів та алгоритмів, які дозволяють точно відтворити логіку функціонування об'єкта дослідження. Імітаційне моделювання є потужним інструментом для вивчення процесів, які складно або неможливо дослідити в реальному часі або умовах. Основною метою побудови імітаційної моделі є створення цифрового аналога системи, що дозволяє аналізувати її поведінку в різних сценаріях, прогнозувати результати змін та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

Серед найбільш поширених підходів до побудови імітаційних моделей виділяють три основні методи: дискретно-подійне моделювання (DES), системну динаміку (SD) та агентне моделювання (ABM). Кожен із цих методів має свої особливості, принципи побудови та сферу застосування. Дискретно-подійне моделювання орієнтоване на послідовне відтворення змін станів системи у моменти виникнення подій. Системна динаміка дозволяє аналізувати накопичувальні процеси в безперервному часі, а агентне моделювання забезпечує моделювання індивідуальної поведінки об'єктів та їх взаємодії між собою.

У цьому підрозділі буде проаналізовано теоретичні основи побудови моделей кожного з підходів, типові алгоритми, що використовуються в рамках їх реалізації, а також критерії вибору методу залежно від поставленої задачі.

Дискретно-подійне моделювання (DES) є одним з найпоширеніших методів імітаційного моделювання, який широко використовується для дослідження, аналізу та оптимізації систем, що функціонують у часі й реагують на події. У цьому підході стан системи змінюється лише в дискретні моменти часу, тобто під час виникнення певних подій. Між цими подіями система вважається стабільною.

Основні принципи DES:

- Подійність: модель не розраховується в кожен момент часу, а лише в моменти подій, таких як прибуття клієнта, початок або завершення обслуговування, зміна стану ресурсу тощо.
- Стан системи: визначається на підставі активних елементів у певний момент – наприклад, скільки клієнтів перебуває в черзі, які ресурси зайняті тощо.
- Часові стрибки: симуляція переходить від однієї події до наступної, не обробляючи кожен мілісекундний відрізок часу.

Основні компоненти моделі DES:

1. Календар подій (event calendar): перелік усіх майбутніх подій із часом їхнього настання. Це основний механізм управління часом у моделі.
2. Черги (queues): моделювання черг очікування на обслуговування (черги клієнтів, об'єктів, вантажів тощо).
3. Ресурси: обмежені елементи, які використовуються для обслуговування (персонал, машини, пакувальники).
4. Станові змінні: змінні, які описують поточний стан системи (розмір черги, статус обладнання тощо).
5. Обробники подій (event handlers): блоки логіки, які визначають, як змінюється система після настання події.

Типовий алгоритм роботи DES-моделі:

1. Ініціалізація змінних та завдання початкових умов.
2. Розміщення першої події у календар.
3. Вибір найближчої події в календарі.
4. Зміна поточного часу на час цієї події.
5. Виконання дій, пов'язаних з подією: зміна стану системи, генерація нових подій.
6. Повторення кроків 3–5 до завершення симуляції (до певного часу або кількості подій).

Алгоритмічні підходи всередині DES:

- Некст-івент підхід (next-event time advance): симулятор переходить до часу наступної події у календарі.
- Процесно-орієнтований підхід: об'єкти (наприклад, клієнти) мають власну поведінку і «процеси», які призупиняються і продовжуються у відповідні моменти часу.
- Об'єктно-орієнтований підхід: компоненти моделі реалізовані як об'єкти з певною логікою, що реагують на події.

Переваги DES:

- Висока точність при моделюванні процесів із послідовністю дій (наприклад, виробничі лінії, черги).
- Гнучкість – можливість моделювати різні сценарії та варіанти функціонування систем.
- Ефективне управління часом моделювання – симуляція не витрачає ресурси на обчислення у періоди без подій.
- Простота відображення логіки обслуговування – легко моделювати обслуговування клієнтів, обробку заявок, роботу складу.

Недоліки DES:

- Складність моделювання поведінки окремих об'єктів (агентів) – DES більше підходить для потоків, ніж для автономних одиниць.
- Обмежена здатність до моделювання безперервних змін – наприклад, фізичні процеси з постійним потоком.
- Менш ефективний для високодинамічних взаємодій між об'єктами, де краще підходить ABM.

Системна динаміка (SD) – це підхід до імітаційного моделювання, який дозволяє аналізувати поведінку складних систем у часі з акцентом на взаємозв'язки, петлі зворотного зв'язку та накопичення. Метод орієнтований на макрорівень, де поведінка системи визначається агрегованими змінними, а не окремими об'єктами чи подіями.

Основні принципи SD:

- Безперервність у часі: модель змінює свій стан постійно, а не в окремі моменти (на відміну від DES).
- Фокус на структурах системи: замість моделювання одиничних подій SD описує, як потоки, накопичення і зворотні зв'язки формують поведінку всієї системи.
- Причинно-наслідкові петлі: аналіз систем базується на виявленні взаємозв'язків, що утворюють цикли посилення або стабілізації.

Основні компоненти моделі SD:

1. Стани (stock): змінні, що накопичують ресурси – наприклад, кількість людей, рівень запасів, гроші.
2. Потоки (flow): швидкість зміни станів – прибуття, витрати, виробництво тощо.
3. Допоміжні змінні (auxiliaries): змінні, що впливають на потоки або стан, обчислюються як функції інших змінних.
4. Зв'язки впливу (causal links): стрілки, що демонструють причинно-наслідкові зв'язки між змінними.

Алгоритм побудови SD-моделі:

1. Формулювання проблеми та визначення меж системи.
2. Побудова каузальної діаграми – зображення всіх причинно-наслідкових зв'язків.
3. Перетворення її в діаграму потоків і накопичень (stock and flow diagram).
4. Формалізація змінних у вигляді диференціальних або різницьових рівнянь.
5. Імітаційне програвання моделі у часі з використанням чисельних методів (наприклад, методу Ейлера).

Алгоритмічні основи SD:

- Розв'язання систем диференціальних рівнянь для знаходження значень змінних на кожному кроці часу.
- Чисельні інтегратори (Euler, Runge-Kutta) використовуються для моделювання безперервної динаміки.

- Побудова зворотних зв'язків – ключ до розуміння довгострокової поведінки системи (наприклад, "більше виробництва → більше споживання → більше виробництва").

Переваги SD:

- Підходить для довгострокового стратегічного аналізу – виявляє, як зміни в структурі впливають на поведінку системи.
- Дає змогу візуалізувати складні взаємозв'язки між змінними через зворотні зв'язки.
- Прозорість моделей – легко показати причинність і логіку прийняття рішень.
- Системне мислення – розкриває приховані залежності та петлі, які не видно при подієвому аналізі.

Недоліки SD:

- Низький рівень деталізації – не моделює індивідуальну поведінку об'єктів.
- Не підходить для подієвих або стохастичних процесів – наприклад, для моделювання черг або обслуговування клієнтів.
- Складність побудови точних моделей – потребує глибокого розуміння системи та її внутрішньої логіки.

Приклади використання SD:

- Економіка: моделювання інфляції, зайнятості, споживання.
- Екологія: баланс популяцій, зміни клімату, споживання ресурсів.
- Бізнес-стратегії: вплив реклами на продажі, управління запасами.
- Охорона здоров'я: моделювання поширення хвороб, політик вакцинації.
- Освіта: взаємозв'язок між рівнем знань, фінансуванням та успішністю.

Агентне моделювання (ABM) – це підхід до імітаційного моделювання, в якому система описується як сукупність автономних об'єктів – агентів, кожен з яких має власні поведінкові правила, стан і можливість взаємодії з іншими агентами та середовищем. Це моделювання "знизу вгору", де глобальна поведінка виникає з локальних взаємодій [28].

Основні принципи АВМ:

- Децентралізація: моделюється не вся система загалом, а окремі агенти з індивідуальною поведінкою.
- Емерджентність (emergence): складна поведінка системи виникає з простої взаємодії між агентами.
- Гетерогенність: кожен агент може мати унікальні характеристики, що дозволяє точно відтворювати різноманітні сценарії.

Основні компоненти АВМ:

1. Агенти: самостійні одиниці моделі з певним станом, цілями, поведінкою.
2. Середовище: простір, у якому існують агенти – може бути просторовим (сітка, площина) або абстрактним.
3. Правила поведінки: логіка, за якою агенти приймають рішення та взаємодіють.
4. Механізми взаємодії: способи обміну інформацією, реакції на дії інших агентів або зміни в середовищі.

Алгоритм побудови АВМ-моделі:

1. Визначення типів агентів, їх характеристик і можливих станів.
2. Розробка правил поведінки та переходів між станами (наприклад, у вигляді скінченної автомати – FSM).
3. Визначення типу середовища та способів розміщення агентів.
4. Налаштування механізмів взаємодії між агентами та середовищем.
5. Проведення імітації з великою кількістю агентів і аналіз емерджентної поведінки.

Алгоритмічні основи АВМ:

- Станові автомати (Finite State Machines) – для моделювання змін станів агентів.
- Локальні правила та поведінкові скрипти – для реалізації індивідуальної логіки.
- Випадковість та стохастика – дозволяє варіативність дій.

- Взаємодія в реальному часі – за допомогою обміну повідомленнями або подій.

Переваги АВМ:

- Моделює реальну поведінку окремих об'єктів – підходить для аналізу складних, гнучких та адаптивних систем.
- Гнучкість у проектуванні – легко додавати нові типи агентів, поведінки чи зв'язки.
- Природне відображення стохастичності та нелінійностей – кожен агент може мати унікальні характеристики та реагувати по-різному.
- Можливість моделювати соціальні, біологічні, економічні процеси з мікрорівня.

Недоліки АВМ:

- Високі обчислювальні витрати – особливо при великій кількості агентів.
- Ускладнене прогнозування глобальної поведінки – через складність емерджентних ефектів.
- Проблеми заліцення та валідації – через стохастичність і складність логіки поведінки.
- Не завжди легко інтерпретувати результати – потрібні статистичні методи для аналізу симуляцій.

Приклади застосування АВМ:

- Соціальні науки: моделювання поведінки натовпу, поширення інформації, еволюції думок.
- Економіка: ринки, споживачі, динаміка попиту і пропозиції.
- Епідеміологія: моделювання поширення хвороб з урахуванням індивідуальної поведінки.
- Логістика та транспорт: автономні агенти-водії, оптимізація трафіку.
- Інтернет речей (IoT): взаємодія розумних пристроїв.

Кожен з методів моделювання – дискретно-подійне моделювання (DES), системна динаміка (SD) та агентне моделювання (ABM) – має свої переваги та

обмеження, і їх доцільно застосовувати в залежності від конкретної проблеми, яку необхідно розв'язати [17].

Дискретно-подійне моделювання (DES) підходить для:

- Процесів з чіткими подіями та станами: коли система складається з обробки подій, таких як черги, обслуговування, переміщення товарів чи людей.
- Складних лінійних та послідовних процесів, де зміни відбуваються на основі конкретних подій, наприклад, в промислових виробничих лініях, транспортуванні вантажів.
- Ситуацій, де важлива обробка черг та взаємодія об'єктів: наприклад, в медичних установах, на виробництві, в інфраструктурних об'єктах (автозаправки, супермаркети тощо).

Коли використовувати:

- У виробничих системах з чіткими, добре структурованими процесами.
- Для моделювання черг і обслуговування, таких як обробка замовлень, рух на складі чи на транспортуванні.

Приклад застосування: моделювання потоку товарів на складі, оптимізація процесів в аеропортах або на митних терміналах.

Системна динаміка (SD) підходить для:

- Моделювання комплексних взаємозв'язків та зворотних зв'язків в системах, де важлива динаміка змін, таких як економіка, екологія, управління підприємствами.
- Моделювання поведінки систем з великими часовими масштабами, наприклад, у випадках з високим рівнем абстракції, коли важлива загальна динаміка та стратегічне планування.
- Систем з нелінійними зв'язками, де є багато факторів, які впливають один на одного.

Коли використовувати:

- Коли необхідно моделювати взаємодію між багатьма змінними на довгостроковій основі.

- Для моделювання складних економічних, соціальних або екологічних систем з великою кількістю зворотних зв'язків.
- Для вивчення сценаріїв та прогнозування поведінки системи за різних умов.

Приклад застосування: модель економічної кризи, динаміка розвитку популяцій, зміни клімату, управління запасами на підприємствах.

Агентне моделювання (ABM) підходить для:

- Моделювання автономних агентів, що взаємодіють один з одним: коли важливими є індивідуальні поведінки та взаємодії агентів у середовищі.
- Ситуацій, де важливо враховувати нелінійність та складну поведінку: кожен агент має свої цілі, стратегії та впливає на середовище та інших агентів.
- Моделювання динаміки, яка виникає з індивідуальних дій агентів, таких як у соціальних системах, екосистемах, на ринках.

Коли використовувати:

- Для дослідження поведінки системи, що складається з багатьох взаємодіючих елементів (агентів).
- Якщо система складається з автономних агентів, які мають власні цілі і можуть взаємодіяти один з одним або з середовищем.
- Для моделювання складних і непередбачуваних ситуацій, де існують соціальні або поведінкові динаміки.

Приклад застосування: моделювання епідемій, поведінки покупців на ринку, динаміки групових процесів, еволюція соціальних структур.

Кожен із цих підходів має свої сильні сторони: дискретно-подійне моделювання забезпечує точне відображення логіки подій у часі, системна динаміка — глобальне уявлення про поведінку системи на макрорівні, а агентне — високу гнучкість і здатність моделювати взаємодію окремих об'єктів з автономною логікою.

Особливу увагу також заслуговують гібридні моделі, які поєднують кілька методів для досягнення більшої реалістичності та точності. При цьому

важливим залишається вибір алгоритмів для управління подіями, розподілу ресурсів, обробки черг, оптимізації тощо, оскільки вони безпосередньо впливають на результативність моделі.

Таблиця 2.2 – Порівняння застосування методів моделювання

Критерій	DES (Дискретно-подійне моделювання)	SD (Системна динаміка)	ABM (Агентне моделювання)
Тип системи	Лінійні та послідовні системи, з чіткими подіями	Складні системи з численними зворотними зв'язками	Системи з автономними агентами та складними взаємодіями
Часова шкала	Моделювання на основі подій, зазвичай з коротким часовим інтервалом	Довгострокові процеси, з динамічними змінами з часом	Зміни, що відбуваються через дії окремих агентів в реальному часі
Інтеракція між елементами	Взаємодія через обробку черг або обслуговування	Взаємодії через зворотні зв'язки, потоки та накопичувачі	Взаємодія між автономними агентами на основі локальних правил
Масштаб системи	Підходить для невеликих і середніх систем	Підходить для великих і стратегічних систем	Підходить для дослідження локальних дій у великих, складних системах
Застосування	Виробничі процеси, логістика, транспортування	Економіка, управління ресурсами, екологія	Соціальні системи, ринки, екологічні моделі, хвороби

Залежно від складності та характеристик моделюваної системи, вибір методу моделювання стає ключовим для успіху проекту. DES підходить для чітко структурованих процесів із послідовними подіями, SD – для систем з нелінійними зв'язками та великими часовими масштабами, а ABM – для моделювання складних систем, що складаються з автономних агентів з індивідуальною поведінкою.

2.3 Постановка задачі моделювання складського приміщення та визначення вимог до моделі.

На основі попереднього аналізу середовищ розробки імітаційних моделей з підтримкою 3D-візуалізації та методів моделювання, було обрано відповідне інструментальне середовище, яке забезпечує необхідну гнучкість, візуалізацію

процесів і можливість подальшого розширення моделі. Такий вибір ґрунтується на здатності середовища реалізовувати дискретно-подійне моделювання та підтримувати інтеграцію з методами м'яких обчислень, що є важливим для виконання поставлених завдань дослідження.

Для ефективного управління логістичними процесами на підприємствах критично важливим є раціональне функціонування складських приміщень та супутніх виробничих елементів, таких як пакувальні лінії. Одним із підходів до аналізу та оптимізації таких систем є створення імітаційної моделі, яка дозволяє відтворити реальні процеси в умовах віртуального середовища, що сприяє глибшому розумінню роботи системи, виявленню вузьких місць та перевірці ефективності різних сценаріїв без втручання у реальні виробничі процеси [26].

У межах цього дослідження розглядається задача моделювання складського приміщення, в якому реалізовано базову логіку обробки вантажів – від моменту їхнього надходження, зберігання до етапу пакування та відправки. Центральним елементом є пакувальна стрічка, яка забезпечує завершальний етап підготовки продукції до доставки або подальшої обробки. Модель має охоплювати ключові етапи руху товару, включаючи процеси прийому, розміщення на складі, переміщення до пакувальної зони, пакування та вихід із системи.

Оскільки модель виконує переважно демонстраційно-аналітичну функцію, вона зосереджена на базових логістичних процесах без надмірного ускладнення. Проте при її побудові враховуються ключові характеристики логістичних систем, зокрема обмеженість ресурсів, часові затримки, накопичення черг та вплив різних факторів на швидкість обробки. Модель стане основою для подальших експериментів та застосування методів м'яких обчислень для оцінки та вдосконалення системи.

Метою моделювання є створення наочної 3D-моделі складського приміщення, яка дозволяє представити основні елементи виробничо-логістичного середовища та забезпечити візуалізацію їхньої взаємодії у форматі імітаційної сцени [40].

Завдання моделювання:

1. Визначити типову структуру складського приміщення з урахуванням зон зберігання, пакування та відвантаження.
2. Розмістити на моделі основні об'єкти: стелажі, пакувальну стрічку, місця персоналу, транспортні засоби.
3. Змодельовати взаємне розташування компонентів для демонстрації логіки організації простору.
4. Забезпечити візуальне представлення процесу (на основі скріншотів або коротких демонстрацій) без реалізації динаміки руху.
5. Підготувати матеріали для подальшого використання моделі як бази для впровадження елементів інтелектуального аналізу.

Загальні вимоги до моделі:

- Модель має бути візуально зрозумілою та структурно логічною.
- Повинна відображати ключові зони складського процесу без деталізації внутрішніх алгоритмів.
- Має бути реалізована у вигляді 3D-сцени з можливістю отримання зображень (скріншотів).
- Повинна бути придатною для використання у подальших аналітичних дослідженнях.
- Модель має бути гнучкою для подальшого розширення (наприклад, із додаванням логіки руху або збору статистики).

У результаті формалізації постановки задачі моделювання було визначено основну мету – створення візуальної 3D-моделі складського приміщення. Така модель дозволяє наочно відобразити просторову організацію елементів системи та взаємне розташування її компонентів. Оскільки акцент робиться на структурній візуалізації без реалізації повноцінної динаміки, модель може слугувати базовим інструментом для демонстрації та подальших досліджень [3]. Сформульовані вимоги забезпечують відповідність моделі її призначенню та відкривають можливості для її подальшого удосконалення.

Висновки до розділу 2.

У другому розділі розглянуто ключові аспекти створення імітаційних моделей із використанням 3D-ресурсів. Детально проаналізовано сучасні програмні середовища, що дозволяють будувати моделі логістичних і виробничих процесів з візуальним представленням у тривимірному форматі. Визначено, які платформи найкраще відповідають потребам проєкту з точки зору функціональності, зручності використання, якості візуалізації та гнучкості налаштувань.

Оцінено підходи до побудови імітаційних моделей та особливості використання різних методів моделювання залежно від задач. Це дозволило зрозуміти, які принципи і алгоритми найкраще підходять для відтворення логіки роботи складських систем і виробничих ліній у цифровому середовищі.

На основі узагальнених теоретичних і практичних даних сформульовано мету моделювання, визначено об'єкти та процеси, що мають бути представлені у моделі, а також сформовано перелік основних вимог до її структури та візуального наповнення. Враховано як функціональні, так і візуальні параметри, що забезпечать ефективне використання моделі в подальшому.

Отримані результати є важливою підготовчою основою для побудови власної моделі складського приміщення, яка буде реалізована в наступному етапі роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ М'ЯКИХ ОБЧИСЛЕНЬ

3.1 Визначення основних факторів ефективності імітаційних моделей із застосуванням 3D – ресурсів

На сьогодні значна частина сучасного виробництва, зокрема в галузі логістики, потребує удосконалення візуалізації процесів для підвищення ефективності управлінських рішень. Одним із перспективних напрямів є використання 3D-імітаційного моделювання, яке дозволяє створити віртуальні репрезентації логістичних процесів, таких як обробка замовлень, пакування продукції чи контроль якості. Однак ефективність таких моделей значною мірою залежить від низки факторів, зокрема продуктивності, рівня деталізації, технічної оптимізації та інтеграції інтелектуальних технологій.

Для підвищення точності розробки моделі складського приміщення, важливо на етапі постановки задачі виділити ключові фактори, які найбільше впливають на результат моделювання [8]. Це дозволяє адаптувати модель під конкретні потреби користувача, оптимізувати її структуру, зменшити навантаження на систему та забезпечити ефективне представлення логістичних операцій у 3D-середовищі.

З метою визначення і оцінки ступеня впливу зазначених факторів, було застосовано метод експертних оцінок у поєднанні з імовірнісним підходом на основі Баєсівської мережі довіри (БМД). На першому етапі було сформовано перелік основних факторів ефективності, що характеризують як технічні, так і функціональні особливості моделі [6].

До експертизи були залучені фахівці в галузі моделювання та автоматизації, а також досвідчені користувачі систем імітаційного моделювання. Оскільки необхідно було визначити тільки ранги важливості факторів, узгодженість експертних думок оцінювалась за допомогою множинного коефіцієнта конкордації K_0 , запропонованого М. Кендаллом і Б. Смітом [23].

Відповідно до результатів експертного опитування, отримано матрицю оцінювання (табл. 3.1), яка використовується для побудови діаграми розподілу вагомості факторів, що впливають на ефективність 3D-імітаційної моделі складського приміщення.

Таблиця 3.1 – Результати експертного оцінювання

m	n(фактори)	Експертні оцінки						
E1	Продуктивність пакувальної лінії – Ф1	9	7	6	7	8	9	9
E2	Ефективність використання простору складу – Ф2	6	5	8	7	7	8	7
E3	Ступінь деталізації операцій – Ф3	9	8	6	10	6	9	8
E4	Швидкість обробки замовлень – Ф4	10	9	9	6	8	7	9
E5	Час упаковки – Ф5	6	9	8	6	8	7	6
E6	Час перевірки якості – Ф6	9	10	10	8	10	7	8
E7	Рівень автоматизації прийняття рішення – Ф7	7	6	7	9	8	10	10
$\sum x_{ij}$	Сума оцінок	56	54	54	53	55	57	57

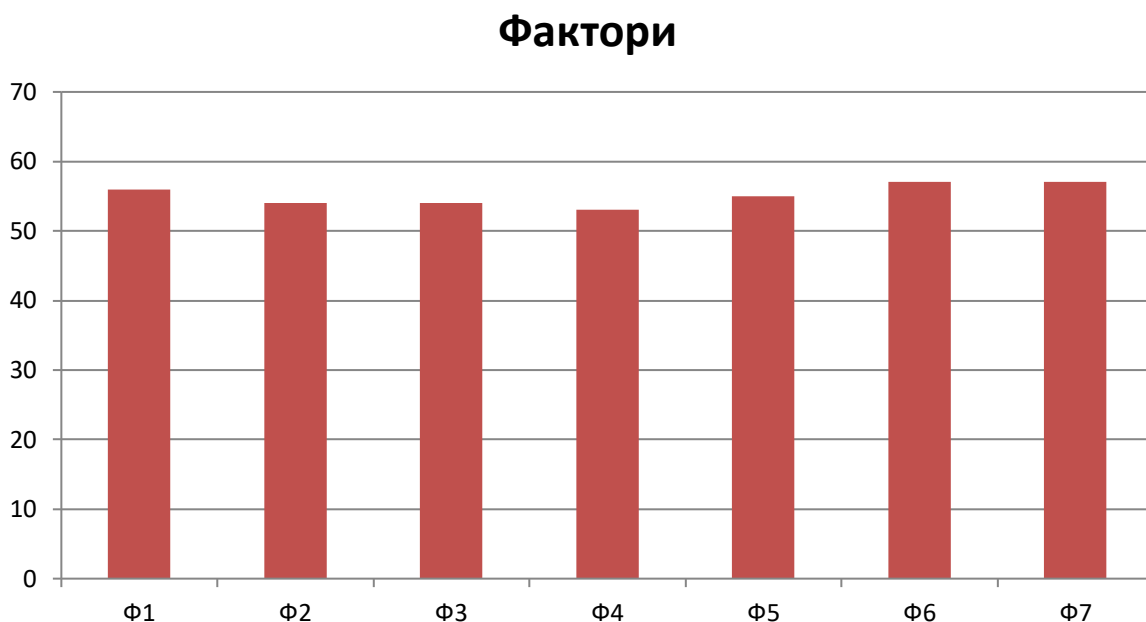


Рис. 3.1 – Рангова діаграма розподілу ступеню важливості факторів

Погодженість думок експертів перевіряється за допомогою F- критерія Фішера. Де через (X_{ij}) позначено ранг j -го виду інформації ($j = 1, n$) у ранжировці i -го експерта ($i = 1, n$). Для оцінки підготовленості експертів дотримуємось умови:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 0,5n(n+1) \quad (3.1)$$

де: $\sum_{j=1}^n X_{ij}$ - сума рангів у ранжировці j -го експерта. Погодженість експертів при ранжировці груп інформації оцінювалася коефіцієнтом конкордації (згоди):

$$K_0 = \frac{12S}{m^2(n^2-n)-m\sum_{i=1}^m T_i} \quad (3.2)$$

де: $S = \sum_{j=1}^n di^2$ - сума квадратів відхилень сум рангів, отриманих усіма групами інформації, від середньо – арифметичного сум рангів

$$dj = X_j - 0.5m(n+1) \quad (3.3)$$

де: d - відхилення суми рангів j -го виду від середнього значення сум рангів по всім видам;

$$T_j = \sum_{\mu=1}^n (t_{\mu i}^3 - t_{\mu i}) \quad (3.4)$$

де: μ -число повторень μ -го рангу в ранжировці i -го експерта.

При $K_0 = 1$ думка експертів вважається узгодженою повністю. При $K_0 < 1$, згідно з рекомендаціями для перевірки значимості погодженості визначаються значення статистики X_1 і X_2 :

$$X_{\text{набл}}(1) = K_0 m(n-1) \quad (3.5)$$

$$X_{\text{набл}(2)} = \frac{(m-1)X_{\text{набл}(1)}}{m(n-1)-X_{\text{набл}(1)}} \quad (3.6)$$

Після чого необхідно визначити числа ступенів свободи (v_1) і (v_2) розподілу, для чого обчислюються значення величин;

$$v_1 = n-1$$

$$v_2 = \frac{L^2}{(m-1)\sum_{j=1}^n v_j^2} - (m-1) \quad (3.7)$$

де: $L = (m-1)\sum_{j=1}^n V_j$

$$V_j = \frac{1}{(m-1)\sum_{i=1}^m (x_{ix} - x_j^2)} \quad (3.8)$$

$$X_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^m X_{ij}, \quad j = \overline{1, n}$$

По таблиці F – розподілу Фішера порівнюємо критичне значення $F_{кр.}$ при рівні значимості $\alpha = 0.05$ і числах ступеню свободи v_1 і v_2 . Порівнюючи отримане значення $X_{\text{набл}}$ зі значенням $F_{кр.}$ робимо висновок, що думки експертів можна вважати погодженими.

3.2. Оцінка ефективності імітаційних моделей із застосуванням 3D – ресурсів з використанням методів м'яких обчислень.

Фактори впливу на процес розробки імітаційних моделей з використанням 3D-ресурсів для моделювання складських приміщень визначають здатність експертів ефективно оцінювати параметри моделі, аналізувати і порівнювати різні гіпотези та варіанти розвитку ситуацій [36]. Результат впливу різноманітних факторів на процес прийняття управлінських рішень залежить не тільки від інтелектуальної спроможності експертів, але й від їхнього досвіду та психологічного стану [7]. Особливістю таких факторів є те, що їх важко виміряти кількісно або записати в точному числовому вигляді.

Однак для оцінки впливу цих факторів застосовуються різноманітні методи, зокрема експертні оцінки, які дозволяють враховувати суб'єктивні аспекти процесу прийняття рішень [9]. Врахування таких чинників може значно підвищити точність і надійність результатів моделювання, але також несе в собі певну міру невизначеності. Для вирішення вказаних проблемних питань розглянута інформаційна модель визначення та оцінки оптимального впливу факторів зовнішнього середовища та когнітивного стану команди на прийняття адекватних рішень. У відповідності до інформаційної моделі використано ймовірнісний математичний апарат та побудована Баєсівська мережа довіри (БМД) (рис.3.2).

БМД являють собою графічні моделі подій і процесів на основі об'єднання деяких виводів теорії ймовірностей і теорії графів. Основу БМД становлять пари $\langle G, B \rangle$, де перший компонент G – це спрямований ациклічний граф, що відповідає випадковим змінним, а друга B – множина параметрів, що визначають систему. Повна загальна ймовірність БМД обчислюється по формулі:

$$P_B(X^{(1)}, \dots, X^{(N)}) = \prod_{i=1}^N P_B(X^{(i)} | P_A(X^{(i)})) \quad (3.9)$$

де: A – множина станів середовища; $N = (x_1, \dots, x_N)$ – вектор параметрів їх розподілів.

Умовна ймовірність події визначається співвідношенням:

$$p(E|H_k) = \frac{p(E \cap H_k)}{p(H_k)} \quad (3.10)$$

де: E й H_k – зв'язані між собою змінні. Ця залежність дозволяє визначити, яка буде ймовірність події E , якщо має місце конкретна подія H_k . Взаємовиключні події формують вичерпну множину, якщо

$$\cup_{i=1}^n E_i = \Omega \quad (3.11)$$

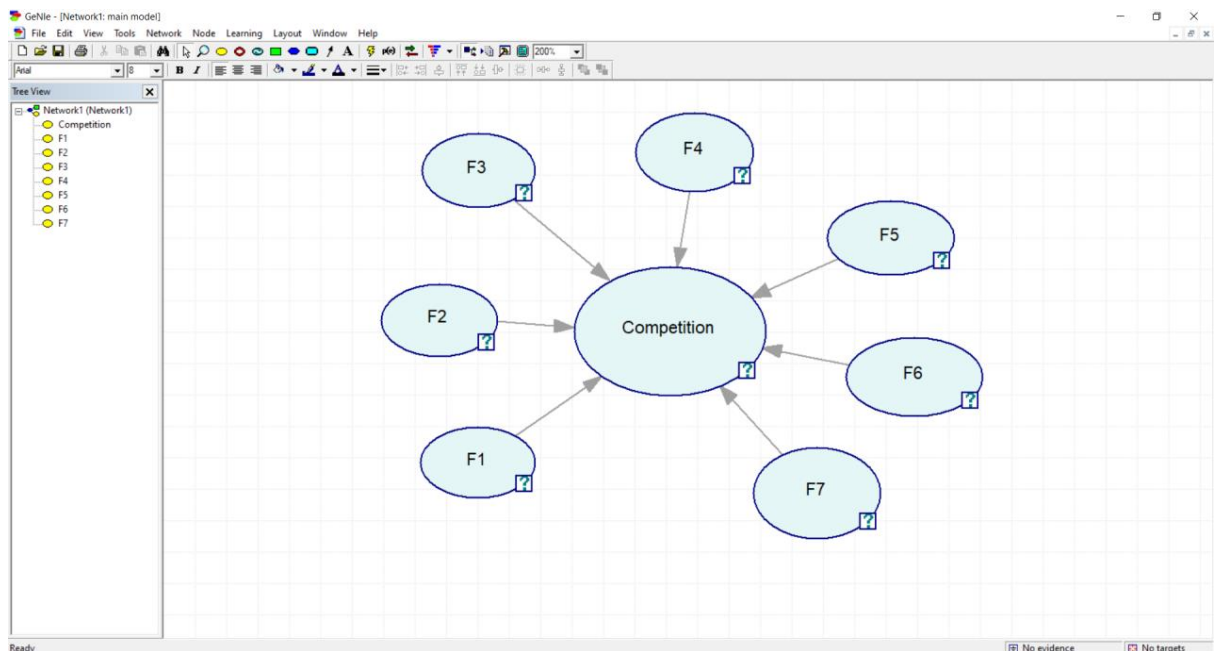


Рис. 3.2 – Баєсівська мережа довіри оцінки впливу факторів

Повна загальна ймовірність БМД обчислюється по формулі:

$$P_B(X^{(1)}, \dots, X^{(N)} = \prod_{i=1}^N P_B(X^{(i)} | P_A(X^{(i)})) \quad (3.12)$$

де: A – множина станів середовища; $N = (x_1, \dots, x_N)$ – вектор параметрів їх розподілів. Умовна ймовірність події визначається співвідношенням:

$$p(E|H_k) = \frac{p(E \cap H_k)}{p(H_k)} \quad (3.13)$$

де: E й H_k – зв'язані між собою змінні. Ця залежність дозволяє визначити, яка буде ймовірність події E , якщо має місце конкретна подія H_k . Взаємовиключні події формують вичерпну множину, якщо

$$\cup_{i=1}^n E_i = \Omega \quad (3.14)$$

Дві змінні не перетинаються, якщо вони не мають однакових значень. Теорія побудови мереж Байеса ґрунтується на припущенні, що події є вичерпними і не перетинаються. У цьому випадку ймовірність події E можна обчислити за допомогою умовних імовірностей:

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E|H_i) \cdot p(H_i) \quad (3.15)$$

Використовуючи формулу, імовірність перетинання подій E і H можна виразити в такий спосіб:

$$p(E \cap H_k) = p(E|H_k) \cdot p(H_k) = p(H_k|E) \cdot p(E) \quad (3.16)$$

звідки одержуємо:

$$p(H_k|E) = \frac{p(E|H_k) \cdot p(H_k)}{p(E)} \quad (3.17)$$

З урахуванням формули (3.2,8) і (3.2.9) можна представити так:

$$p(H_k|E) = \frac{p(E|H_k) \cdot p(H_k)}{\sum_{i=1}^n p(E|H_i) \cdot p(H_i)} \quad (3.18)$$

Для оцінки та корегування взаємовпливу визначених факторів на ефективність побудованої 3-D моделі, пропонується ймовірнісний підхід з використанням Баєсівської мережі довіри (БМД) [16]. Для побудови БМД, експертам – користувачам, пропонувалось оцінити вірогідність позитивного і негативного ступеню впливу найбільш вагомих факторів в інтервалі (0 – 1), результати експертного оцінювання наведено в таблиці 3.2

Таблиця 3.2 – Результати експертного оцінювання

Фактори	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7
Значно	0.75–1	0.7–1	0.65–1	0.6–1	0.7–1	0.65–1	0.8–1
Незначно	0–0.25	0–0.3	0–0.35	0–0.4	0–0.3	0–0.35	0–0.25

Для інтегральної оцінки ступеня впливу j -м показником деякою властивістю Y використано середнє значення ймовірності

$$P_{(y_j)} = \frac{1}{m} \sum_i^m P_i(y_i)$$

Використовуючи результати експертних оцінок, наведені в таблиці 3.2, обчислення ймовірностей за допомогою Байєсівської мережі довіри доцільно виконати за допомогою спеціалізованого програмного пакета Genie 2.0. На рисунку 3.3 представлений приклад результатів оцінки факторів, що впливають на ефективність імітаційних моделей з використанням 3D-ресурсів.

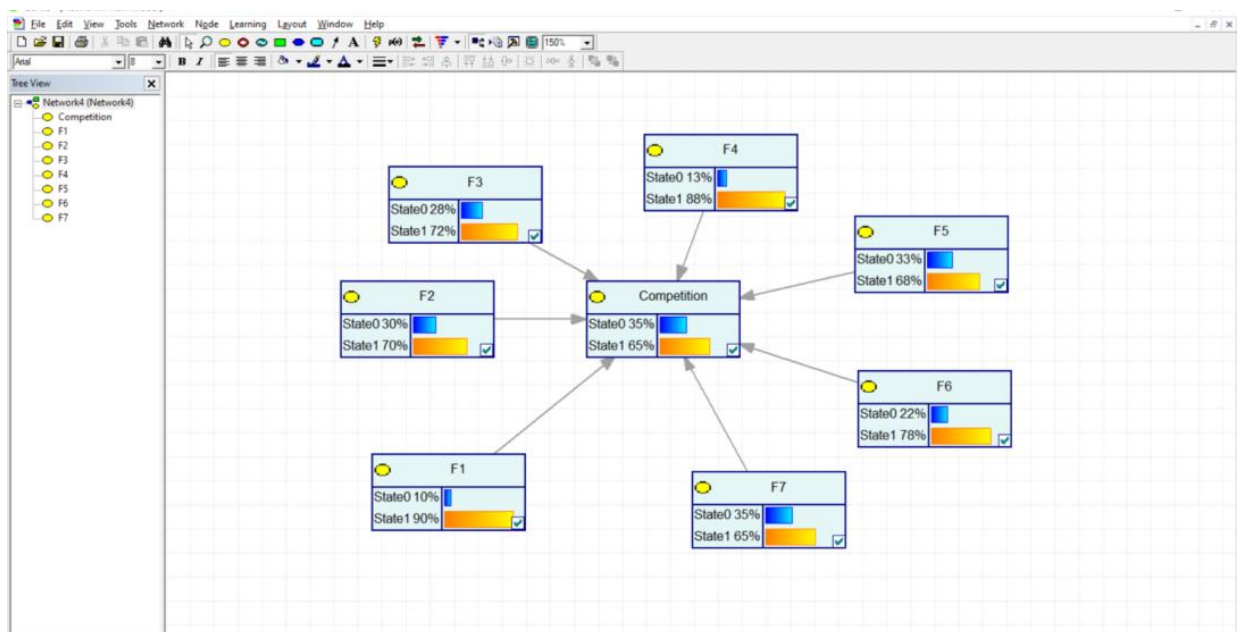


Рис. 3.3 – Гістограма результатів оцінки факторів впливу

3.3. Вибір середовища розробки імітаційної моделі із застосуванням 3D – ресурсів.

У процесі розробки імітаційних моделей складських приміщень важливим етапом є вибір відповідного середовища для моделювання. Вибір інструменту безпосередньо впливає на ефективність, точність та зручність моделювання, оскільки кожне середовище має свої особливості та переваги залежно від специфіки задачі [30]. У даній роботі, де акцент робиться на візуалізацію та аналіз процесів роботи складського приміщення, було обрано програмне забезпечення AnyLogic. Це середовище дозволяє застосовувати різні методи моделювання, таких як дискретно-подійне моделювання, системну динаміку та агентне моделювання, що є необхідними для створення комплексних і гнучких моделей для оптимізації складських процесів.

Вибір AnyLogic як середовища для розробки імітаційної моделі складського приміщення був обумовлений рядом факторів, що визначають ефективність і гнучкість цього програмного забезпечення для вирішення поставлених завдань. Однією з основних переваг AnyLogic є його здатність підтримувати різні методи моделювання, зокрема дискретно-подійне моделювання (DES), системну динаміку (SD) та агентне моделювання (ABM). Ці методи дозволяють детально моделювати як конкретні події в процесах обробки і пакування замовлень, так і загальні тенденції, наприклад, зміни у попиту або поведінку окремих агентів, таких як робітники чи автоматизовані системи [31].

Додатковою перевагою AnyLogic є можливість використання 3D-візуалізації, що є важливим для візуалізації складських процесів. Моделювання в 3D дозволяє детально зображати всі етапи роботи складського приміщення, що робить процес більш зрозумілим і наочним для кінцевих користувачів. Це особливо важливо, коли потрібно продемонструвати поведінку об'єктів у просторі та їх взаємодію. Висока якість графіки також покращує сприйняття моделі, що може бути корисним для тестування або презентації результатів перед замовниками.

Крім того, AnyLogic забезпечує високу продуктивність, що є критично важливим при роботі з великими і складними моделями, що включають численні об'єкти та деталі. Програма здатна ефективно працювати навіть з великими обсягами даних, забезпечуючи точність симуляцій без суттєвих втрат у швидкодії. Це дозволяє створювати моделі, які можуть включати численні варіанти взаємодії об'єктів та оптимізувати складські процеси без шкоди для продуктивності.

Ще одним важливим аспектом є зручність інтерфейсу AnyLogic. Платформа має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що полегшує створення та налаштування моделей навіть для користувачів, які не мають глибоких знань в програмуванні. Програма також підтримує вбудовані інструменти для налагодження та тестування моделей, що дозволяє швидко виявляти і виправляти помилки, забезпечуючи ефективне і безперешкодне моделювання.

AnyLogic також забезпечує можливість інтеграції з іншими програмами та системами, такими як системи управління складом (WMS) або ERP-системи, що дає змогу використовувати актуальні дані в процесі симуляції. Це відкриває нові можливості для більш точного моделювання і дозволяє враховувати зовнішні фактори, які можуть впливати на роботу складського приміщення.

Усі ці можливості роблять AnyLogic ідеальним вибором для створення імітаційної моделі складського приміщення, де важливо поєднати високоякісну візуалізацію, потужні аналітичні інструменти і інтеграцію з іншими системами для досягнення максимальної ефективності.

3.3.1 Створення скриптового ресурсу.

Сучасні імітаційні моделі активно використовують скриптові ресурси для підвищення адаптивності та ефективності. Використання скриптових мов програмування, таких як Java, Python або JavaScript, дозволяє автоматизувати процеси, налаштовувати поведінку агентів та інтегрувати моделі з зовнішніми системами. У цій роботі розглядаються основні принципи створення

скриптових ресурсів в імітаційних моделях, а також їх роль в оптимізації виробничих процесів [39].

Скриптові ресурси виконують такі функції:

- Автоматизація бізнес-логіки (управління об'єктами моделі, взаємодія агентів).
- Інтеграція з базами даних (зчитування та запис параметрів моделювання).
- Розширення можливостей стандартних бібліотек (створення користувацьких функцій).
- Оптимізація процесів (динамічне налаштування параметрів в залежності від вхідних умов).

У контексті імітаційного моделювання складського приміщення скрипти можуть контролювати рух продукції, змінювати параметри процесів у реальному часі та взаємодіяти із зовнішніми системами моніторингу.

Процес створення скриптового ресурсу включає наступні етапи:

1. Вибір мови програмування

У більшості імітаційних середовищ використовуються такі мови:

- Java – підходить для обробки подій, керування агентами та складних математичних обчислень.

- Python – використовується для аналітики, обробки даних та машинного навчання.

- JavaScript – застосовується для роботи з 3D-графікою та взаємодії з користувачем.

2. Інтеграція скрипту в модель

У середовищі AnyLogic скрипти можна додати через:

- Блок “Code” – для визначення користувацьких функцій.
- Action – для виконання коду під час певних подій (наприклад, вхід агента в процес).
- Dynamic Variables – для збереження динамічних параметрів моделі.

Скриптовий ресурс для складського приміщення в AnyLogic:

Модель імітує процес роботи складського приміщення, яка включає наступні етапи:

1. Надходження товарів на склад – товарні одиниці надходять на склад із джерела (Source) або з іншого етапу виробничого процесу.
2. Очікування в черзі – якщо пакувальна лінія чи інший робочий центр зайнятий, товар накопичується в черзі (Queue) для подальшої обробки.
3. Упаковка товару – товар проходить через пакувальний робочий центр (Service - Packing), де його упаковують у відповідні одиниці.
4. Перевірка якості – упаковані одиниці товару проходять контроль якості в робочому центрі (Service - Inspection), де здійснюється перевірка на відповідність стандартам якості.
5. Відвантаження – після упаковки і контролю якості, готовий товар відвантажується зі складу до споживача або на наступний етап (Sink).

Для оптимізації процесу використовується спеціальний скриптовий ресурс, який:

- Динамічно змінює продуктивність пакувальної лінії, якщо черга перевищує заданий поріг, забезпечуючи ефективне управління потоком товару.
- Реалізує автоматичний контроль якості, задаючи ймовірність виникнення дефектів у продукції для подальшої обробки.
- Записує статистику проходження одиниць товару через різні етапи складської і пакувальної лінії, що дозволяє зібрати дані для подальшого аналізу та оптимізації процесів.

Код у AnyLogic (Java):

Динамічне регулювання швидкості пакувальної лінії:

Цей скрипт змінює продуктивність пакувального модуля залежно від розміру черги:

```
if (queue.size() > 10) {
    packingService.set_capacity(2); // Збільшення продуктивності
} else {
    packingService.set_capacity(1); // Робота в звичайному режимі
```

}

Де:

- queue.size() – поточна кількість деталей у черзі перед упаковкою.

- set_capacity() – зміна кількості одночасно оброблюваних деталей.

На даному етапі розробки моделі сформовано базову логіку функціонування складського приміщення з пакувальною лінією. Основна мета — відтворити послідовність процесів, починаючи з надходження вантажу на склад, його обробки та закінчуючи відвантаженням після проходження пакувального циклу. Логіка моделі реалізується шляхом компонування базових блоків моделювання (джерело, черга, обробка, контроль, вихід) та створення скриптового ресурсу, який забезпечує гнучке керування процесами всередині системи.

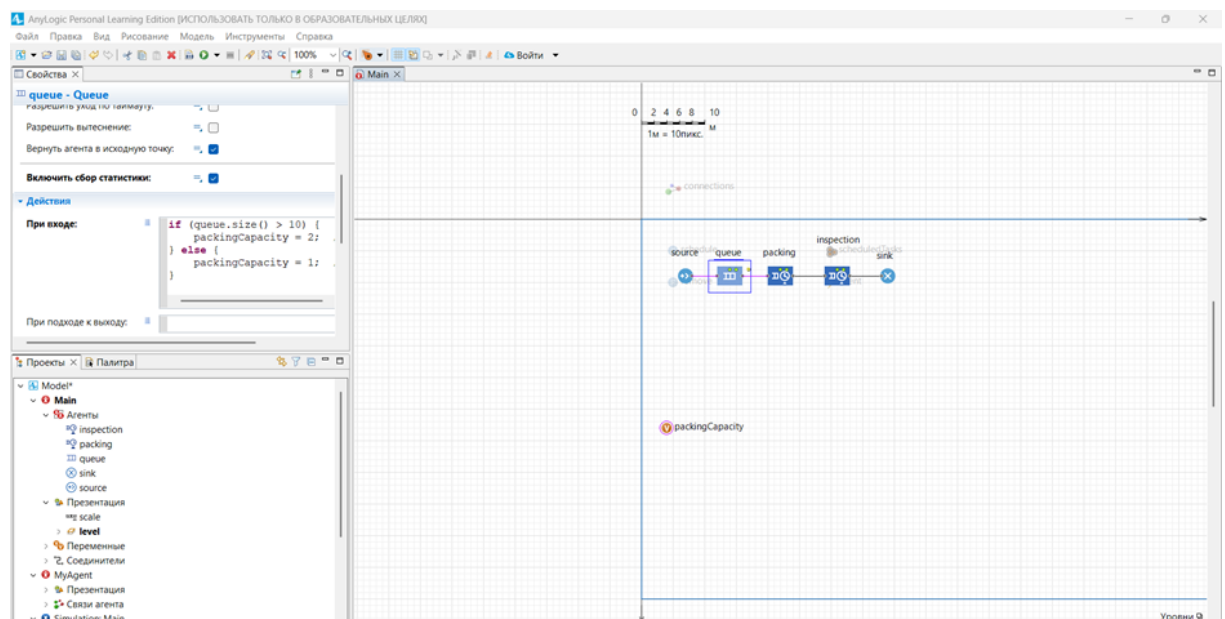


Рис 3.4 – Початкове компонування логіки моделі в AnyLogic

Запис статистики у файл:

Для збору даних про продуктивність пакувальної лінії використовується збереження статистики у CSV-файл:

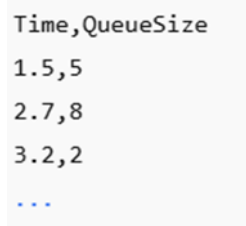
```
import java.io.FileWriter;
import java.io.IOException;
FileWriter writer;
```



```
try {
    writer = new FileWriter("production_log.csv", true);
    writer.append(time() + "," + completedProducts + "," + defectiveProducts +
"\n");
    writer.flush();
    writer.close();
} catch (IOException e) {
    e.printStackTrace();
}
```

Де:

- time() – поточний час імітації.
- completedProducts – кількість успішно упакованих деталей.
- defectiveProducts – кількість забракованих виробів.



```
Time,QueueSize
1.5,5
2.7,8
3.2,2
...
```

Рис. 3.5 – Продуктивність пакувальної лінії

Візуалізація 3D-моделі складського приміщення:

Щоб додати 3D-модель в Presentation, потрібно:

1. Перейти у вкладку Presentation → 3D Object.
2. Вибрати 3D-модель упаковки (наприклад, коробки або стрічкового транспортера).
3. Встановити положення packingService у сцені та прив'язати об'єкт до стану обробки.
4. Додати анімацію:

```
packing3DObject.setRotation(0, time() * 360, 0); // Обертання об'єкта
```

упаковки

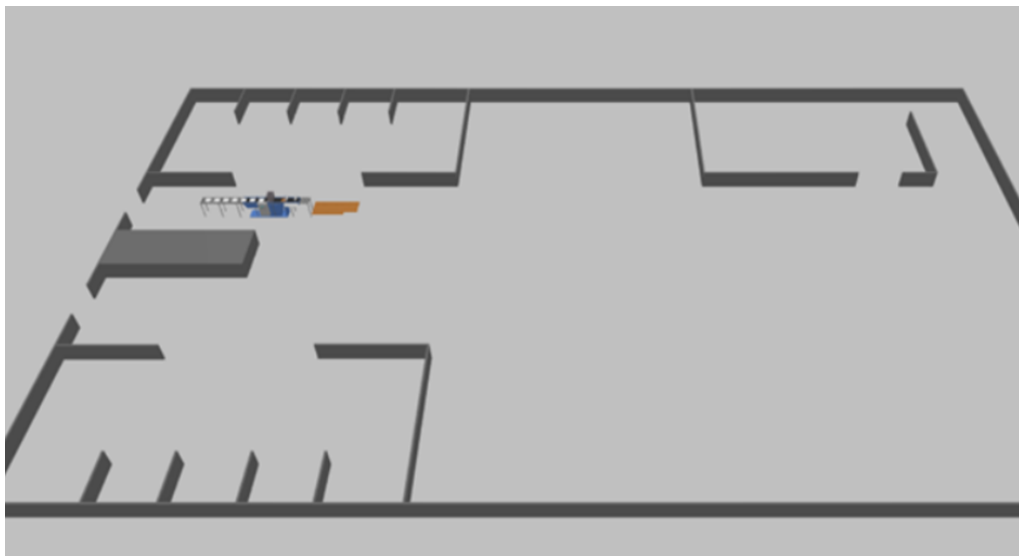


Рис. 3.6 – Створення партії та частини конвеєра

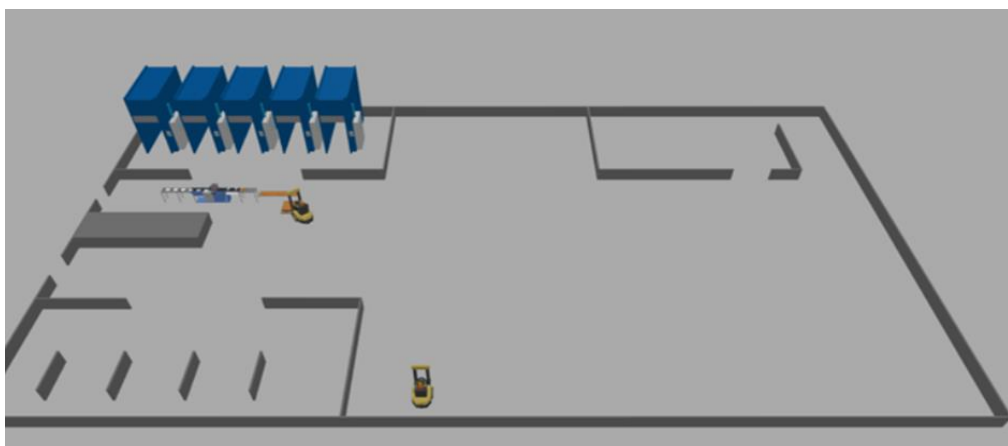


Рис. 3.7 – Моделювання навантажувачів

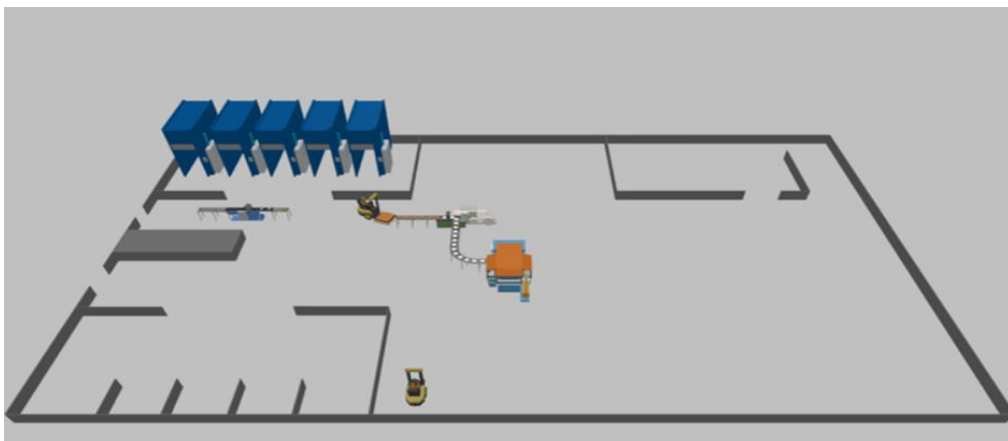


Рис. 3.8 – Створення модулю перевірки якості

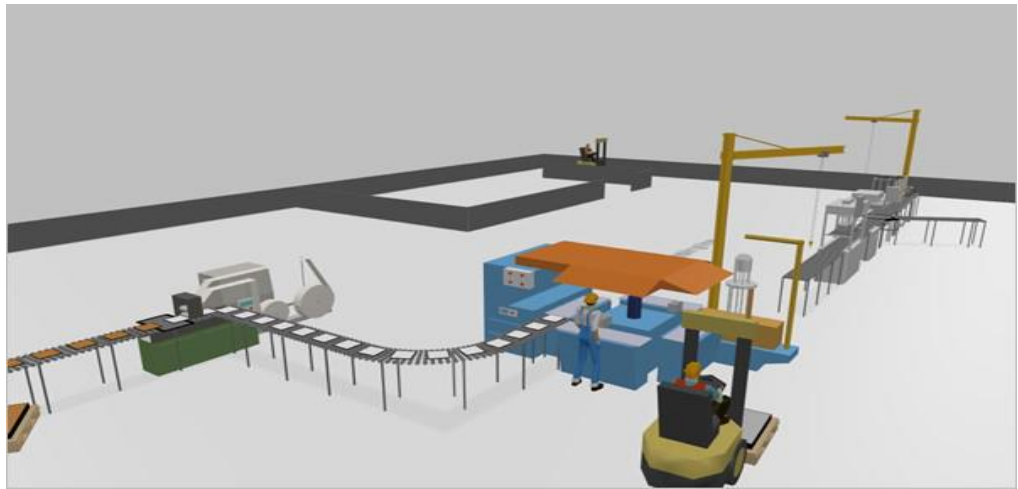


Рис. 3.9 – Кінцевий результат створення імітаційної моделі

Застосування скриптових ресурсів у AnyLogic дозволяє підвищити продуктивність виробничих процесів шляхом:

- Автоматичного регулювання швидкості упаковки.
- Контролю якості продукції з використанням стохастичних методів.
- Збору даних для подальшого аналізу та оптимізації.
- Подальше покращення моделі може включати використання нейронних мереж або нечіткої логіки для адаптивного управління виробництвом.

3.3.2 Розробка скрипта внутрішнього чату.

Розвиток інформаційних технологій сприяє інтеграції інструментів комунікації в середовища імітаційного моделювання, що дозволяє покращити взаємодію користувачів у багатокористувацьких системах. Одним із таких інструментів є внутрішній чат, який забезпечує обмін повідомленнями між операторами, аналітиками та керівниками у реальному часі.

У цій роботі представлено методологію розробки скрипта внутрішнього чату для імітаційної моделі складського приміщення. Основною метою є створення ефективного засобу комунікації між користувачами моделі та інтеграція механізму обміну повідомленнями у середовище AnyLogic.

Внутрішній чат повинен забезпечувати наступні функції:

- Передача повідомлень у реальному часі між користувачами моделі.
- Збереження історії діалогів для подальшого аналізу.
- Фільтрація повідомлень за пріоритетами (технічні помилки, загальні обговорення тощо).
- Автоматичні повідомлення від системи про зміну статусу виробничого процесу.
- Інтеграція з логікою моделі, щоб користувачі отримували сповіщення про важливі події.

В основі внутрішнього чату лежить серверно-клієнтна архітектура, що реалізується за допомогою Java-скриптів у AnyLogic.

Основні компоненти системи:

1. MessageQueue – черга повідомлень, яка зберігає повідомлення у реальному часі.
2. UserInterface – графічний інтерфейс для взаємодії користувачів з чатом.
3. EventListener – механізм для перехоплення подій у моделі та надсилання відповідних сповіщень.
4. MessageLogger – збереження історії повідомлень у файл або базу даних.

Реалізація черги повідомлень:

```
import java.util.concurrent.ConcurrentLinkedQueue;

public class MessageQueue {
    private ConcurrentLinkedQueue<String> messages = new
ConcurrentLinkedQueue<>();

    public void addMessage(String message) {
        messages.add(message);
    }

    public String getMessage() {
        return messages.poll();
    }

    public boolean hasMessages() {
```

```

        return !messages.isEmpty();
    }
}

```

Опис:

- Використовується `ConcurrentLinkedQueue`, що забезпечує потокобезпечну обробку повідомлень.
- Метод `addMessage()` додає нове повідомлення до черги.
- Метод `getMessage()` отримує найстаріше повідомлення для відображення.

Взаємодія користувачів із чатом:

```

public class ChatUser {
    private String username;
    private MessageQueue chatQueue;

    public ChatUser(String username, MessageQueue chatQueue) {
        this.username = username;
        this.chatQueue = chatQueue;
    }

    public void sendMessage(String message) {
        chatQueue.addMessage(username + ": " + message);
    }

    public void readMessages() {
        while (chatQueue.hasMessages()) {
            System.out.println(chatQueue.getMessage());
        }
    }
}

```

Опис:

- Кожен користувач має унікальне ім'я `username`.
- `sendMessage()` додає повідомлення до черги.
- `readMessages()` виводить усі доступні повідомлення

Автоматичні повідомлення від системи:

```
public class EventListener {
    private MessageQueue chatQueue;
    public EventListener(MessageQueue chatQueue) {
        this.chatQueue = chatQueue;
    }
    public void onEvent(String event) {
        chatQueue.addMessage("[СИСТЕМА]: " + event);
    }
}
```

Опис:

- onEvent() використовується для надсилання сповіщень про зміни у виробничому процесі (наприклад, поломки, перевищення порогових значень).

Приклад використання:

```
EventListener systemEvents = new EventListener(chatQueue);
systemEvents.onEvent("Лінія упаковки перевищила ліміт
продуктивності!");
```

Результат у чаті:

[СИСТЕМА]: Лінія упаковки перевищила ліміт продуктивності!

Внутрішній чат можна візуалізувати у вкладці Presentation:

1. Додати об'єкт TextArea для відображення повідомлень. Додати кнопку Button для надсилання повідомлень.
2. Створити TextField для введення повідомлень.
3. Додати Java-код для оновлення інтерфейсу:

```
chatTextArea.setText(chatTextArea.getText() + "\n" +
chatQueue.getMessage());
```

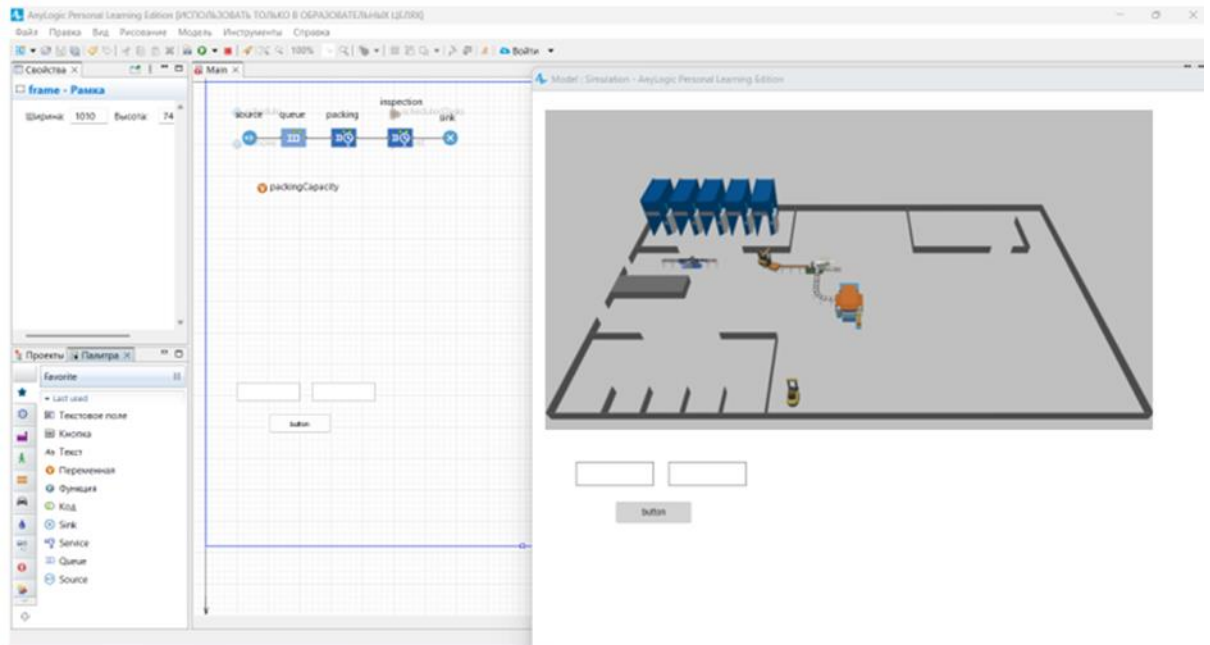


Рис. 3.10 – Візуалізація внутрішнього чату в AnyLogic

Результат: користувачі можуть взаємодіяти через чат безпосередньо в моделі.

Таблиця 3.3 – Порівняння внутрішнього чату з іншими методами комунікації

Параметр	Внутрішній чат	Зовнішній месенджер	Email-сповіщення
Реальний час	Так	Ні	Ні
Логуювання	Так	Так	Так
Інтеграція з моделлю	Так	Ні	Ні
Фільтрація повідомлень	Так	Так	Ні

Розробка внутрішнього чату дозволяє інтегрувати механізм комунікації в середовище імітаційного моделювання. Запропонований підхід включає скриптову реалізацію, візуалізацію у AnyLogic та автоматизовані сповіщення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на використання штучного інтелекту для аналізу повідомлень і прогнозування проблем у виробничому процесі.

3.3.3 Розробка скрипту роботи камери для демонстрації моделі.

У сучасних інтерактивних системах комунікації важливу роль відіграють засоби відеозв'язку, які забезпечують ефективну взаємодію користувачів у реальному часі. У контексті імітаційного моделювання виробничих процесів, зокрема виробничої лінії упаковки, інтеграція камери у внутрішній чат дозволяє:

- підвищити оперативність прийняття рішень;
- покращити контроль за виробничими процесами;
- підвищити рівень комунікації між операторами та керівниками.

У даній роботі представлено методику розробки скрипту роботи камери для внутрішнього чату в середовищі AnyLogic із використанням Java та WebRTC.

Основні вимоги до відеозв'язку:

- Стримінг відео в реальному часі – передача відеопотоку без затримок.
- Можливість вмикання та вимикання камери – забезпечення гнучкості використання.
- Відображення відео в інтерфейсі чату – інтеграція з UI.
- Підтримка одночасної роботи кількох камер – для групових нарад.

Для реалізації цих вимог застосовується технологія WebRTC, яка підтримує передачу відео та аудіо через WebSocket або peer-to-peer підключення.

Основні компоненти архітектури системи відеозв'язку:

- VideoStream – керування відеопотоком з камери користувача.
- ChatInterface – графічний інтерфейс для взаємодії з чатом.
- WebRTCHandler – модуль WebRTC для передачі відео.
- SignalingServer – сервер для встановлення WebRTC-з'єднання.

Схема взаємодії:

Користувач 1 (Камера) —► WebRTCHandler —► Signaling Server
 —► WebRTCHandler —► Користувач 2 (Екран)

Ця схема дозволяє передавати відеопотік між користувачами безпосередньо або через сервер.

Реалізація скрипту роботи камери:

Ініціалізація камери користувача:

```
function startCamera() {
    navigator.mediaDevices.getUserMedia({ video: true, audio: false })
        .then(function(stream) {
            let videoElement = document.getElementById('localVideo');
            videoElement.srcObject = stream;
        })
        .catch(function(error) {
            console.error("Помилка доступу до камери: ", error);
        });
}
```

Опис:

- Використовується `getUserMedia()`, що надає доступ до веб-камери.
- Потік прив'язується до `videoElement` для відображення у вікні чату.

Вмикання/вимикання камери

let videoStream;

```
function toggleCamera() {
    if (!videoStream) {
        navigator.mediaDevices.getUserMedia({ video: true })
            .then(function(stream) {
                videoStream = stream;
                document.getElementById('localVideo').srcObject = stream;
            });
    } else {
        videoStream.getTracks().forEach(track => track.stop());
        videoStream = null;
        document.getElementById('localVideo').srcObject = null;
    }
}
```

```

    }
  }

```

Опис:

- Користувач може вмикати або вимикати камеру натисканням кнопки.

Передача відео через WebRTC

```

const peerConnection = new RTCPeerConnection();
navigator.mediaDevices.getUserMedia({ video: true, audio: false })
    .then(stream => {
        stream.getTracks().forEach(track => peerConnection.addTrack(track,
stream));
    });
peerConnection.ontrack = function(event) {
    document.getElementById('remoteVideo').srcObject = event.streams[0];
};

```

Опис:

- Використовується RTCPeerConnection для прямого відеозв'язку між клієнтами.
- ontrack отримує відеопотік від іншого користувача та відображає його у чаті.

Для інтеграції в AnyLogic потрібно додати JavaScript-код у Custom HTML:

```

<video id="localVideo" autoplay></video>
<button onclick="toggleCamera()">Вкл/Викл камери</button>

```

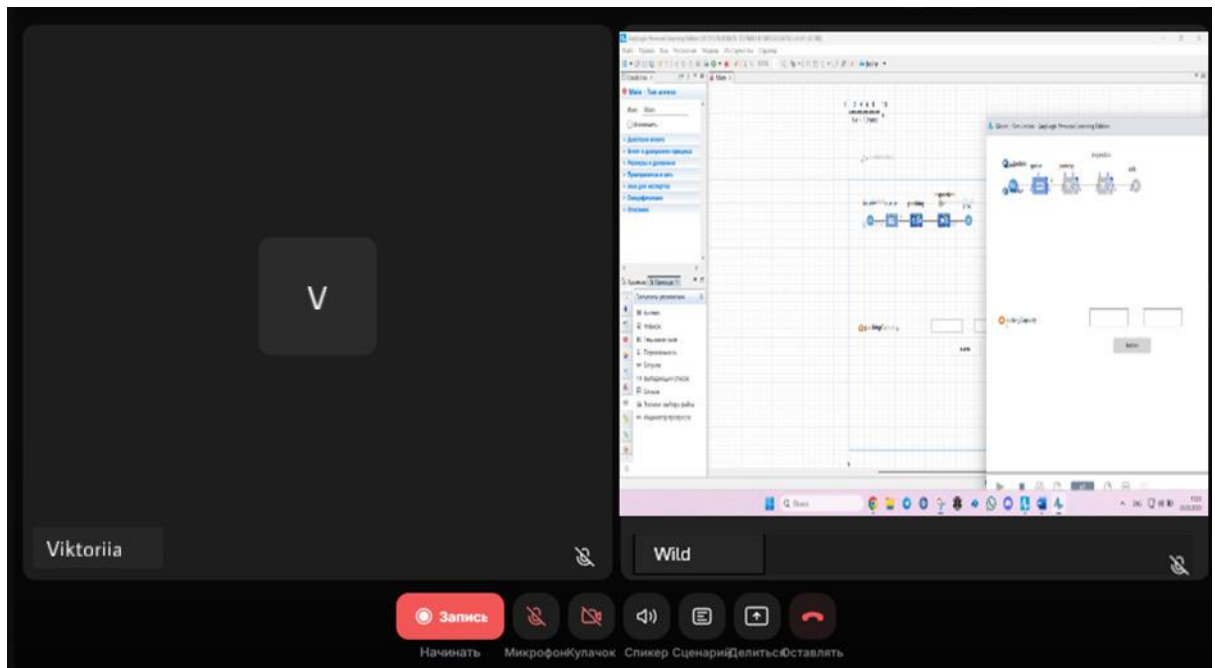


Рис. 3.11 – Відеопотік у вікні чату

Розроблений скрипт роботи камери забезпечує інтерактивний відеозв'язок між користувачами внутрішнього чату в середовищі AnyLogic. Запропонована архітектура дозволяє ефективно передавати відео в реальному часі, а використання WebRTC забезпечує низьку затримку та мінімальне навантаження на сервер.

Подальші дослідження можуть включати:

- Додавання аудіозв'язку для покращення комунікації.
- Оптимізацію споживання ресурсів для роботи в умовах обмеженої пропускної здатності.
- Використання штучного інтелекту для аналізу відеопотоку та розпізнавання подій на виробничій лінії.

Висновки до розділу 3.

У третьому розділі проведено розробку імітаційної моделі з використанням 3D-ресурсів і методів м'яких обчислень. Основну увагу приділено визначенню факторів, що впливають на ефективність таких моделей.

Серед них – якість візуалізації, швидкість обробки даних, простота взаємодії з моделлю, адаптивність до змін і можливість автоматизації аналізу.

Застосування методів м'яких обчислень дало змогу оцінити ефективність моделей за низкою параметрів, використовуючи експертні оцінки та нечіткі логічні підходи. Це дозволило отримати більш гнучкі та реалістичні результати, враховуючи фактори, що складно формалізуються у точних числових значеннях.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано вибір середовища розробки моделі, яке найкраще відповідало поставленим вимогам. У рамках практичної реалізації було створено інструменти взаємодії з 3D-моделлю, зокрема скрипти для внутрішнього чату, управління камерою та реалізації базових функцій візуалізації.

Отримані результати демонструють можливість ефективного поєднання тривимірного моделювання з методами м'яких обчислень для побудови гнучких, наочних і функціональних імітаційних моделей. Це створює підґрунтя для подальшого вдосконалення моделей та їх застосування в практичних логістичних задачах.

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Законодавче та нормативне забезпечення охорони праці користувачів ПК.

Умови праці осіб, що виконують роботу з використанням персональних комп'ютерів (ПК), регулюються чинним законодавством України у сфері охорони праці. Основною метою законодавчого забезпечення є створення безпечних та нешкідливих умов праці, попередження професійних захворювань, а також забезпечення прав працівника на охорону здоров'я в процесі трудової діяльності.

Основні документи, що регулюють вимоги охорони праці при роботі з ПК:

- Закон України «Про охорону праці» – визначає загальні засади реалізації права працівників на безпечні та здорові умови праці, встановлює обов'язки роботодавця і працівника, гарантії та компенсації.
- Кодекс законів про працю України – передбачає вимоги щодо тривалості робочого часу, відпочинку, умов праці та охорони праці.
- ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми при роботі з відеодисплейними терміналами» – встановлює санітарно-гігієнічні вимоги до обладнання, робочого місця та режиму праці користувачів ПК.
- Наказ МОЗ України № 382 від 29.12.2017 – затверджує гігієнічні нормативи факторів робочого середовища та важкості праці.

Згідно із законодавством, роботодавець (у контексті дипломної роботи – це може бути університет, установа, або віртуально змодельоване середовище) зобов'язаний:

- забезпечити відповідність робочих місць вимогам безпеки та ергономіки;
- організовувати періодичне навчання, інструктаж та перевірку знань з охорони праці;
- створити умови для раціонального режиму праці та відпочинку;

- проводити медичні огляди працівників, зайнятих за комп'ютерами понад 50% робочого часу.

У свою чергу, користувач комп'ютера (студент, працівник, розробник) зобов'язаний:

- дотримуватись правил безпеки праці;
- правильно організовувати своє робоче місце;
- вчасно повідомляти про виявлені порушення умов праці або ознаки погіршення самопочуття.

Дотримання цих нормативних актів забезпечує не лише збереження працездатності користувачів ПК, а й підвищує ефективність роботи, знижує ризики виникнення професійних захворювань, пов'язаних з тривалим статичним навантаженням та інтенсивним зоровим напруженням.

4.2 Виробничі шкідливі і небезпечні фактори при роботі з комп'ютером.

Хоча робота за персональним комп'ютером на перший погляд здається безпечною, вона пов'язана з низкою шкідливих і потенційно небезпечних виробничих факторів, які можуть негативно впливати на здоров'я користувача. Особливо актуальними ці питання стають при тривалій щоденній роботі за ПК без дотримання нормативних вимог до умов праці.

Основні шкідливі фактори:

1. Напруження зорового аналізатора.

Тривале фокусування погляду на екран призводить до зорової втоми, сухості очей, погіршення зору. Синдром «комп'ютерного зору» — поширене явище серед користувачів, яке характеризується розмитістю зображення, болем у очах, почервонінням, головним болем.

2. Статичне фізичне навантаження.

Під час роботи за комп'ютером м'язи спини, шиї, плечей та рук знаходяться в напруженому стані. Малорухомість призводить до порушення

кровообігу, болей у спині, шиї, виникнення остеохондрозу, а також синдрому зап'ястного каналу (тунельного синдрому).

3. Електромагнітне випромінювання.

Сучасні монітори мають мінімальні рівні електромагнітного випромінювання, проте при тривалому перебуванні біля великої кількості електронної техніки (монітор, системний блок, принтер тощо) може спостерігатись сумарний вплив електромагнітного поля.

4. Шум та вібрації.

Джерелами шуму є системні блоки, вентилятори, принтери. Постійний шум на рівні понад 50 дБ може викликати дратівливість, головний біль, зниження концентрації уваги.

5. Психоемоційне навантаження.

Особливо властиве для студентів та спеціалістів, які виконують інтенсивну інтелектуальну роботу, пов'язану з високою відповідальністю, дедлайнами, великим обсягом інформації. Такі умови можуть призводити до перевтоми, стресу, зниження працездатності.

6. Незадовільні мікрокліматичні умови.

Недостатнє або занадто інтенсивне освітлення, неправильна температура повітря, надмірна сухість або вологість також можуть чинити негативний вплив на стан здоров'я користувача.

Небезпечні фактори:

- Імовірність ураження електричним струмом у разі пошкодження кабелів, неправильної експлуатації техніки або відсутності заземлення.
- Пожежна небезпека, пов'язана з перегріванням електронного обладнання, коротким замиканням, перенавантаженням мережі.

Згідно з нормативними документами, всі ці фактори мають бути враховані під час організації робочого місця користувача ПК, а заходи щодо їх усунення або зменшення — обов'язковими.

4.3 Вимоги до організації робочого місця користувача ПК.

Раціональна організація робочого місця при роботі з персональним комп'ютером є одним із найважливіших чинників, що забезпечують безпеку праці, збереження здоров'я та підвищення продуктивності користувача. Відповідно до вимог Державних санітарних правил і норм (ДСанПіН 3.3.2.007-98) та інших нормативних документів, робоче місце повинно відповідати наступним основним параметрам:

1. Ергономічні характеристики меблів та розміщення обладнання:
 - Стіл повинен мати достатню площу для розміщення монітора, клавіатури, миші та інших необхідних пристроїв. Оптимальна висота столу – 70-75 см.
 - Стілець повинен бути регульованим за висотою та мати підтримку для попереку. Сидіння повинно забезпечувати комфортне положення з можливістю вільного руху ніг.
 - Положення монітора: верхня межа екрану має знаходитися на рівні очей користувача або трохи нижче, відстань від очей до екрану – 50-70 см. Монітор розміщується прямо перед користувачем, щоб уникнути повороту голови.
 - Клавіатура і миша розташовуються таким чином, щоб зап'ястя залишалися у нейтральному положенні, а руки – розслабленими.
2. Освітлення робочого місця:
 - Забезпечується рівномірне та достатнє освітлення без сліпучих відблисків на екрані.
 - Рекомендована освітленість становить 300-500 люкс.
 - Переважно використовувати природне освітлення, доповнене лампами з розсіяним світлом.
3. Мікрокліматичні умови:
 - Температура повітря повинна підтримуватись у межах 20-24 °С.
 - Відносна вологість – 40-60%.
 - Регулярне провітрювання приміщення.

4. Шум і вібрації:

- Рівень шуму на робочому місці не повинен перевищувати 50 дБ.
- Вібрації від обладнання мають бути мінімізовані.

5. Організація робочого простору:

- Вільний простір для ніг не повинен бути обмежений меблями чи кабелями.
- Кабелі мають бути акуратно організовані, щоб уникнути спотикання або пошкодження.

Дотримання цих вимог допомагає знизити ризик виникнення професійних захворювань, покращити самопочуття та продуктивність під час тривалої роботи за комп'ютером.

4.4 Режим праці та відпочинку при роботі за ПК.

Раціональний режим праці і відпочинку є ключовим елементом забезпечення охорони праці та збереження здоров'я користувачів комп'ютерної техніки. Тривала монотонна робота за ПК призводить до швидкої втоми, зниження концентрації уваги, погіршення зору та інших негативних наслідків.

Основні рекомендації щодо режиму праці:

1. Тривалість безперервної роботи: не рекомендується працювати без перерв довше ніж 1 годину. Оптимальний інтервал безперервної роботи – 45-50 хвилин.
2. Перерви: після кожних 45-50 хвилин роботи слід робити коротку перерву тривалістю 5-10 хвилин. Під час перерви рекомендується відволікатися від екрану, виконувати легкі фізичні вправи або вправи для очей.
3. Вправи для очей: сприяють зменшенню зорової втоми. Рекомендується робити вправи, які включають переміщення погляду на різні відстані, моргання, закриття очей на кілька секунд.
4. Зміна пози та рухова активність: під час перерв бажано змінити положення тіла, пройтися, зробити прості вправи для шиї, спини та рук.

Особливості режиму для студентів і офісних працівників:

Для студентів рекомендовано організувати роботу з комп'ютером так, щоб сумарний час безперервної роботи не перевищував 3-4 годин на день, розділених на кілька сесій.

Для офісних працівників, які проводять більшість робочого часу за ПК, важливо дотримуватися режиму перерв, а також проходити профілактичні медичні огляди.

Вплив дотримання режиму праці:

Регулярні перерви і фізична активність під час роботи сприяють зниженню втоми, збереженню гостроти зору, покращенню кровообігу та запобігають розвитку професійних захворювань.

4.5 Робочий інвентар та обладнання.

Правильне оснащення робочого місця користувача персонального комп'ютера є важливою умовою безпечної і комфортної праці, що значно знижує ризики виникнення професійних захворювань та підвищує продуктивність.

До основних елементів робочого інвентарю належать:

1. Офісні меблі.

Регульовані по висоті стільці зі спинкою, що підтримує попереk, а також столи з достатньою площею робочої поверхні. Ергономічні меблі допомагають підтримувати правильну поставу та знижують статичне навантаження на опорно-руховий апарат.

2. Монітори.

Переважно з антивідблисковим покриттям і можливістю регулювання кута нахилу та висоти, що сприяє зменшенню зорової втоми.

3. Клавіатури та миші ергономічної форми.

Призначені для мінімізації навантаження на кисті рук і зап'ястя, запобігають розвитку тунельного синдрому та інших порушень.

4. Підставки під ноги.

Допомагають забезпечити правильне положення нижніх кінцівок, що особливо важливо для людей із низьким ростом або при тривалій сидячій роботі.

5. Килимки для миші з підтримкою зап'ястя.

Знижують навантаження на зап'ястковий суглоб та покращують комфорт при роботі з маніпулятором.

6. Захисні екрани та фільтри.

Використовуються для зниження рівня електромагнітного випромінювання і зменшення навантаження на зір.

7. Освітлювальні прилади.

Лампи з розсіяним світлом, які забезпечують комфортне рівномірне освітлення робочої зони відповідно до санітарних норм.

Відповідно до діючих санітарних правил і норм (ДСанПіН 3.3.2.007-98, ГОСТ 12.2.032-78) робочий інвентар має бути адаптований до фізіологічних особливостей працівника, забезпечувати оптимальні умови для виконання робочих завдань і сприяти збереженню здоров'я.

Правильний вибір і використання робочого інвентарю значно підвищують комфорт, знижують ризики травматизму, виникнення професійних захворювань опорно-рухового апарату, очей і нервової системи.

4.6 Профілактика професійних захворювань при роботі з ПК.

Профілактика професійних захворювань є важливою складовою охорони праці користувачів персональних комп'ютерів. Вона спрямована на зниження ризиків розвитку таких захворювань, як комп'ютерний зоровий синдром, порушення опорно-рухового апарату, а також психоемоційного виснаження.

Основні заходи профілактики:

1. Правильна організація робочого місця:

Дотримання ергономічних вимог, забезпечення комфортного положення тіла, відповідного освітлення та мікроклімату.

2. Дотримання режиму праці та відпочинку:

Регулярні перерви для відпочинку очей та рухової активності, що допомагає зменшити фізичне і психоемоційне навантаження.

3. Фізична активність і вправи:

Виконання спеціальних гімнастичних вправ для очей, шиї, спини та рук, які сприяють зняттю напруги та покращують кровообіг.

4. Психологічна підтримка:

Організація робочого процесу з урахуванням індивідуальних особливостей, уникнення перевантажень, підтримка позитивного психологічного клімату.

5. Медичний контроль:

Регулярні профілактичні медичні огляди, що дозволяють вчасно виявляти перші ознаки професійних захворювань та приймати відповідні заходи.

6. Навчання та інструктажі з охорони праці:

Ознайомлення користувачів ПК з правилами безпечної роботи, методами профілактики шкідливих факторів.

Охорона праці при роботі з персональним комп'ютером є невід'ємною складовою безпечного і здорового робочого процесу в сучасних умовах, особливо для користувачів, які проводять значну частину часу за комп'ютерною технікою. У цьому розділі було розглянуто основні аспекти охорони праці, які мають враховуватися при організації роботи в сфері інформаційних технологій, навчання та офісної діяльності.

Перш за все, нормативно-правова база створює фундаментальні вимоги, що регламентують умови праці користувачів ПК, забезпечуючи їх безпеку та збереження здоров'я. Виробничі шкідливі та небезпечні фактори, такі як зорове напруження, статичні навантаження на опорно-руховий апарат, електромагнітне випромінювання, шум і психоемоційне перевантаження, вимагають системного підходу до їх мінімізації.

Раціональна організація робочого місця, що включає ергономічно підібрані меблі, правильне розташування комп'ютерного обладнання, оптимальне освітлення та відповідний мікроклімат, суттєво знижує ризики

виникнення професійних захворювань. Особливу увагу необхідно приділяти режиму праці і відпочинку, який передбачає регулярні перерви, фізичні вправи та зміну позицій тіла, що допомагає знімати втомлення та покращує загальний стан здоров'я.

Комплексна профілактика професійних захворювань при роботі з ПК включає не лише технічні та організаційні заходи, а й медичний контроль, психологічну підтримку та навчання працівників. Вчасне виявлення проблем і впровадження профілактичних дій сприяють збереженню працездатності, підвищенню продуктивності праці та зменшенню кількості випадків захворювань, пов'язаних із тривалою роботою за комп'ютером.

Таким чином, дотримання вимог охорони праці — це не лише виконання нормативних документів, а й важлива умова забезпечення комфортних, безпечних і здорових умов праці в сучасному інформаційному суспільстві.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було реалізовано імітаційне моделювання складського приміщення із застосуванням 3D-ресурсів, що дало змогу наочно представити ключові етапи внутрішньої логістики, від надходження продукції до її відвантаження після пакування. Основною метою дослідження була побудова моделі, яка б демонструвала послідовність логістичних процесів, дозволяла візуалізувати взаємодію об'єктів на складі та давала змогу наочно оцінити вплив окремих факторів на ефективність функціонування системи.

У межах роботи було здійснено попередній аналіз сучасних середовищ імітаційного моделювання, зокрема таких як FlexSim, Tecnomatix Plant Simulation, Simio, Visual Components, Witness Horizon та AnyLogic. За результатами порівняння було обрано середовище AnyLogic, що забезпечує зручний інтерфейс, підтримку кількох парадигм моделювання, можливість роботи зі скриптами та 3D-візуалізацією. Попри обмеження безкоштовної версії, середовище дозволило повноцінно реалізувати необхідну структуру складської моделі з базовою візуалізацією.

Розроблена модель відображає основні логістичні етапи, серед яких надходження продукції, її накопичення в чергах, процес пакування, контроль якості та відвантаження. Для забезпечення гнучкості та точності імітації в моделі було застосовано базову скриптову логіку. Хоча повноцінна динаміка процесів не моделювалася в реальному часі, було досягнуто високого рівня візуального представлення ключових етапів, що відповідає поставленим завданням дипломної роботи.

Одним із важливих етапів дослідження стало визначення основних факторів, які впливають на ефективність моделі. Було сформовано перелік із семи найбільш значущих характеристик, серед яких: продуктивність обчислень, оптимізація 3D-моделей, рівень деталізації, швидкість обробки замовлень, час упаковки, час перевірки якості та застосування методів оптимізації й

машинного навчання. Для оцінки ступеня їх важливості було залучено експертів, які надали оцінки кожному з факторів, що дозволило провести аналіз за допомогою методу експертних оцінок.

З метою подальшої формалізації взаємозв'язків між факторами було застосовано методи м'яких обчислень, зокрема ймовірнісний підхід на основі байєсівської мережі довіри. Отримані результати дали змогу виявити ключові чинники, що мають найбільший вплив на ефективність функціонування складського процесу та можуть бути використані для подальшої оптимізації як моделі, так і реального об'єкта управління.

Загалом результати дослідження підтверджують доцільність використання імітаційного моделювання з застосуванням 3D-ресурсів для представлення і візуального аналізу логістичних процесів. Робота також демонструє практичну цінність застосування методів м'яких обчислень у поєднанні з експертним підходом для виявлення критичних факторів ефективності, що може стати основою для подальших досліджень і вдосконалення моделей у сфері підтримки прийняття рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Андрущенко В. П., Іноземцева Н. В. *Інформаційні технології в управлінні* : навч. посіб. – Київ : Ліра-К, 2021. – 280 с.
2. Крамар О. С., Кравченко Т. В. *Сучасні інформаційні системи і технології в менеджменті*. – Львів : Новий Світ, 2022. – 312 с.
3. Пелешко Д. Ю. *Системи підтримки прийняття рішень : теорія і практика*. – Тернопіль : ТНТУ, 2021. – 205 с.
4. Дорошенко Ю. М. *Моделювання інформаційних систем* : навч. посіб. – Київ : КНЕУ, 2020. – 184 с.
5. Костирко Л. І. *Основи моделювання складних систем*. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2023. – 268 с.
6. Передерій В. І., Нужний С. М. *Інтелектуальні та інформаційно-когнітивні технології підтримки прийняття рішень* : навч. посіб. – Миколаїв : Миколаївський національний університет імені В. О. Сухомлинського, 2023. – 125 с.
7. Бойко О. О. *Методи м'яких обчислень у прийнятті рішень*. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 198 с.
8. Савченко Л. М. *Байєсівські мережі в задачах моделювання*. – Дніпро : ДНУ, 2021. – 156 с.
9. Чабанюк О. В. *Системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності*. – Івано-Франківськ : ПНУ, 2023. – 170 с.
10. Кузьменко Т. О. *Основи імітаційного моделювання*. – Київ : НаУКМА, 2020. – 158 с.
11. Хоменко І. І. *Інформаційні технології та системи в управлінні*. – Київ : НАУ, 2023. – 194 с.
12. Law A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. – New York : McGraw-Hill, 2021. – 792 p.
13. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. *Discrete-Event System Simulation*. – 6th ed. – Boston : Pearson, 2021. – 640 p.

14. Borshchev A. *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic*. – AnyLogic North America, 2022. – 620 p.
15. Luger G. F. *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*. – Boston : Pearson, 2021. – 768 p.
16. Jensen F. V., Nielsen T. D. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. – 2nd ed. – New York : Springer, 2020. – 447 p.
17. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. – 4th ed. – New York : Pearson, 2021. – 1152 p.
18. Wittek P. *Quantum Machine Learning: What Quantum Computing Means to Data Mining*. – Amsterdam : Academic Press, 2021. – 176 p.
19. Rouse W. B. *Enterprise Transformation: Understanding and Enabling Fundamental Change*. – Hoboken : Wiley, 2021. – 312 p.
20. Kolaczyk E. D. *Statistical Analysis of Network Data with R*. – New York : Springer, 2021. – 250 p.
21. Smith J., Taylor A., Hughes D. *Simulation modeling in warehouse operations: A review* // International Journal of Production Research. – 2021. – Vol. 59, No. 12. – P. 3654–3670.
22. Zhang L., Wang J. *3D visualization in manufacturing simulation* // Computers in Industry. – 2022. – Vol. 136. – Article 103596.
23. Lee J., Park Y. *Application of Bayesian networks for decision support in logistics* // Decision Support Systems. – 2020. – Vol. 129. – P. 113168.
24. Chen X., Zhao M., Yu D. *Soft computing techniques in industrial decision making* // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2023. – Vol. 34. – P. 845–861.
25. Tanaka K., Hirota K. *Fuzzy logic applications in production systems* // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 2021. – Vol. 51(6). – P. 3421–3430.
26. Kumar S., Sharma P. *Use of machine learning in optimizing supply chains* // Procedia Computer Science. – 2022. – Vol. 200. – P. 550–556.

27. Petrović D., Ivanović M., Stefanović D. *Simulation tools for warehouse design* // *Simulation Modelling Practice and Theory*. – 2023. – Vol. 122. – Article 102655.
28. Singh M., Prakash M., Ghosh A. *Agent-based modeling of warehouse operations* // *Journal of Simulation*. – 2022. – Vol. 16, No. 2. – P. 145–157.
29. Thomas A., Francis M., Fisher R. *Discrete event simulation and digital twins in logistics* // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2021. – Vol. 61. – P. 220–232.
30. Wang Y., Huang Z., Liu C. *Optimization of packaging lines using simulation* // *Computers & Industrial Engineering*. – 2020. – Vol. 147. – P. 106656.
31. AnyLogic Company. *AnyLogic Simulation Software User Manual* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.com/resources/>
32. European Simulation and Modelling Conference 2022. *Proceedings on Simulation in Logistics and Supply Chain* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eurosis.org>
33. IEEE Xplore. *Digital Twins and Simulation in Logistics*. 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org>
34. ACM Digital Library. *Simulation-based decision support in smart manufacturing*. 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dl.acm.org>
35. SpringerLink. *Advances in Soft Computing and Simulation Techniques*. 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://link.springer.com>
36. ResearchGate. *Use of Bayesian networks in industrial modeling*. 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net>
37. MDPI. *Applied Sciences: 3D simulation and visualization in logistics*. 2022 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com>
38. Scopus. *Simulation & Optimization in Warehousing (2020–2024)*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.scopus.com>

- 39.Elsevier. *Simulation and Modelling Practice and Theory*. Recent volumes [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.journals.elsevier.com>
- 40.Google Scholar. *Results on “Bayesian networks warehouse simulation”*. 2020–2024 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://scholar.google.com>
- 41.AnyLogic Blog. *Simulation modeling case studies*. 2023 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.anylogic.com/blog/>