

# ДЕРЖАВНИЙ ТОРГОВЕЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій

## ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

### «Імітаційне моделювання роботи квиткових кас»

Студентки 4 курсу, 8 групи,  
спеціальності  
122 «Комп'ютерні науки»

Старостюк Ольги  
Вікторівни

*підпис студента*

Науковий керівник  
старший викладач

Селіванова Анна  
Віталіївна

*підпис керівника*

Гарант освітньої програми  
кандидат технічних наук, професор

Демідов Павло  
Георгійович

*підпис керівника*

Київ 2023

# Державний торговельно-економічний університет

Факультет інформаційних технологій  
Кафедра комп'ютерних наук та інформаційних систем  
Спеціальність 122 «Комп'ютерні науки»

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ **Затверджую**  
**Пурський О.І.**  
«12» грудня 2022р.

## Завдання на випускню кваліфікаційну роботу студентки

**Старостюк Ольги Вікторівни**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

«Імітаційне моделювання роботи квиткових кас»

Затверджена наказом ректора від 9 грудня 2022 р. №3332

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 30 травня 2023 року

3. Цільова установка та вихідні дані до роботи

*Мета роботи:* Розробка імітаційної моделі роботи квиткових кас

*Об'єкт дослідження:* процеси функціонування квиткових кас

*Предмет дослідження:* інформаційні технології імітаційного моделювання

4. Перелік графічного матеріалу \_\_\_\_\_

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів, за якими здійснюється консультування:

Розділ	Консультант (прізвище, ініціали)	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Селіванова Анна Віталіївна	15.12.2022 р.	15.12.2022 р.
2	Селіванова Анна Віталіївна	15.12.2022 р.	15.12.2022 р.
3	Селіванова	15.12.2022 р.	15.12.2022 р.

6. Зміст випускної кваліфікаційної роботи (перелік питань за кожним розділом)

## ВСТУП

### РОЗДІЛ 1. Загальна проблематика імітаційного моделювання

- 1.1. Сучасний стан імітаційного моделювання
- 1.2. Аналіз особливостей імітаційного моделювання
- 1.3. Інформаційні технології імітаційного моделювання

### РОЗДІЛ 2. Розробка моделі роботи квиткових кас

- 2.1. Специфіка функціонування квиткових кас
- 2.2. Розробка діаграм взаємодії
- 2.3. Розробка імітаційної моделі роботи квиткових кас

### РОЗДІЛ 3. Реалізація імітаційної моделі роботи квиткових кас

- 3.1. Специфіка побудови імітаційних моделей
- 3.2. Реалізація імітаційної моделі в середовищі AnyLogic
- 3.3. Проведення оптимізаційного експерименту

## ВИСНОВКИ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

7. Календарний план виконання роботи

№ Пор.	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	
		За планом	фактично
1	2	3	4
1	Вибір теми випускної кваліфікаційної роботи	04.10.2022	04.10.2022
2	Розробка та затвердження завдання на випускну кваліфікаційну роботу	15.12.2022	15.12.2022
3	Вступ	03.02.2023	03.02.2023
4	РОЗДІЛ 1. Загальна проблематика імітаційного моделювання	28.02.2023	28.02.2023
5	РОЗДІЛ 2. Розробка моделі роботи квиткових кас	06.04.2023	06.04.2023
6	РОЗДІЛ 3. Реалізація імітаційної моделі роботи квиткових кас	12.05.2023	12.05.2023

7	Висновки	15.05.2023	15.05.2023
8	Здача випускної кваліфікаційної роботи на кафедрі науковому керівнику	05.06.2023	05.06.2023
9	Попередній захист випускної кваліфікаційної роботи	31.05.2023- 01.06.2023	31.05.2023- 01.06.2023
11	Виправлення зауважень, зовнішнє рецензування випускної кваліфікаційної роботи	02.06.2023	02.06.2023
12	Представлення готової зшитої випускної кваліфікаційної роботи на кафедрі	05.06.2023- 15.06.2023	13.06.2023
13	Публічний захист випускної кваліфікаційної роботи	За розкладом роботи ЕК	

8. Дата видачі завдання «15» грудня 2022 р.

Керівник випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

Селіванова А.В.

(прізвище, ініціали, підпис)

Гарант освітньої програми

Демідов П.Г.

(прізвище, ініціали, підпис)

Завдання прийняв студент-дипломник

Старостюк О.В.

(прізвище, ініціали, підпис)

9. Відгук керівника випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

---



---



---



---

Керівник випускної кваліфікаційної роботи (проекту)

30.05.2023 р.

(підпис, дата)

10. Висновок про випускну кваліфікаційну роботу

Випускна кваліфікаційна робота студента

Старостюк О.В.

(прізвище, ініціали)

може бути допущена до захисту в екзаменаційній комісії.

Гарант освітньої програми

Демідов П.Г.

(підпис, прізвище, ініціали)

Завідувач кафедри

Пурський О.І.

(підпис, прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_\_ » 2023 р.

## АНОТАЦІЯ

У даній роботі досліджено особливості використання імітаційних моделей, розглянуто стан галузі на даний момент та описано її проблеми та виклики. Для реалізації обрано задачу симуляції квиткової каси, побудовано імітаційну модель та діаграми взаємодії для даної задачі. Виконано симуляцію моделі в середовищі Anylogic, покроково описано її проектування, протестовано експеримент та доведено працездатність розробленої моделі.

Ключові слова: модель, імітаційне моделювання, експеримент.

## ABSTRACT

This paper examines the peculiarities of using simulation models, examines the state of the industry at the moment, and describes its problems and challenges. For implementation, the task of simulating a ticket office was chosen, a simulation model and interaction diagrams for this task were built. The model was simulated in the Anylogic environment, its design was described step-by-step, the experiment was tested, and the performance of the developed model was proven.

Keywords: model, simulation modeling, experiment.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ПРОБЛЕМАТИКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	6
1.1 Сучасний стан імітаційного моделювання.....	9
1.2 Аналіз особливостей імітаційного моделювання.....	12
1.3 Інформаційні технології імітаційного моделювання .....	14
2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОБОТИ КВИТКОВИХ КАС .....	20
2.1 Специфіка функціонування квиткових кас .....	20
2.2 Розробка діаграм взаємодій.....	21
2.3 Розробка імітаційної моделі роботи квиткових кас .....	24
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ КВИТКОВИХ КАС .....	26
3.1 Специфіка побудови імітаційних моделей.....	26
3.2 Реалізація імітаційної моделі в середовищі AnyLogic .....	30
3.3 Проведення оптимізаційного експерименту .....	34
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	39

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Дослідження з теми імітаційного моделювання роботи квиткових кас є дуже актуальним в наш час. У зв'язку зі швидким розвитком технологій та поширенням електронних платіжних систем, відбувається зміна способів продажу та обліку квитків. В той же час, фізичні квиткові каси залишаються використовуваними в багатьох галузях, таких як транспорт, культура, спорт тощо. Тому важливо досліджувати процес роботи квиткових кас та знайти оптимальні рішення щодо їх ефективності та економічної вигідності.

Застосування імітаційного моделювання є перспективним у даній області досліджень, оскільки цей метод дозволяє відтворити роботу квиткових кас у віртуальному середовищі та дослідити різні сценарії їх функціонування. При цьому можна врахувати різні фактори, які впливають на роботу кас, такі як кількість клієнтів, швидкість обробки замовлень, навантаження на обладнання тощо. Такий підхід дозволяє знайти оптимальні рішення щодо розстановки кас, розробки програмного забезпечення та організації роботи персоналу.

Окрім того, дослідження з даної теми має практичне значення. Результати дослідження можуть бути використані для покращення роботи квиткових кас у різних галузях та зниження витрат на їх обслуговування.

Однією з особливостей постановки питань стосовно конкретних умов дослідження імітаційного моделювання роботи квиткових кас є визначення мети дослідження та постановка задач, які необхідно вирішити для досягнення цієї мети. Наприклад, якщо метою дослідження є покращення ефективності роботи кас у кінотеатрах, то необхідно вирішити питання щодо розміщення кас, розробки оптимальних алгоритмів продажу квитків та організації роботи персоналу.

Не менш важливою особливістю є вибір параметрів, які будуть враховуватися при імітаційному моделюванні. Це можуть бути такі параметри, як кількість клієнтів, що приходять до кас, середній час обробки замовлень, час очікування

клієнтів у черзі та інші. Важливо правильно підібрати дані параметри, щоб результати дослідження відображали реальні умови роботи кас.

Окрім того, під час вирішення питань стосовно конкретних умов дослідження важливо враховувати особливості різних галузей, де використовуються квиткові каси. Наприклад, в транспорті можуть бути особливості стосовно розміщення кас, тарифів та типів квитків, в культурі – щодо розкладу сеансів та попиту на квитки. Тому важливо враховувати специфіку кожної галузі та використовувати цю інформацію під час дослідження.

**Об'єкт дослідження:** процеси функціонування квиткових кас.

**Предмет дослідження:** інформаційні технології імітаційного моделювання.

У дипломній роботі застосовані різні **методи дослідження**, які допоможуть отримати більш детальну та точну інформацію про роботу кас та визначити оптимальні параметри їх роботи. До них належать методи моделювання, експерименту, статистичного дослідження, проектування складних систем, оптимізації.

**Інформаційне забезпечення дослідження** є дуже важливим, оскільки воно забезпечує отримання необхідних даних для побудови імітаційної моделі роботи квиткових кас та проведення дослідження.

Основними джерелами інформації є статистичні дані, які можуть бути отримані з квиткових кас, а саме: кількість проданих квитків, їх типи, час продажу, кількість клієнтів та їх розподіл протягом дня, тижня та місяця. Також, до нетрадиційних інформаційних джерел можна віднести опитування клієнтів, дані з соціальних мереж, датчиків, GPS та відеоспостережень.



# 1. ЗАГАЛЬНА ПРОБЛЕМАТИКА ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

## 1.1 Сучасний стан імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання є ефективним способом імітації реальної системи через її представлення мовою моделювання. Хоча моделювання базується на дисциплінах науки про прийняття рішень та інформаційних технологій, цей метод вважається більш систематичною та цінною методологією для розробки теорії та аналізу в дослідженнях бізнесу та менеджменту. Однак наукові кола в бізнесі та менеджменті не скористалися ефективними методами моделювання для проведення досліджень. Тим часом вчені з інших соціальних наукових дисциплін, таких як психологія, здається, далеко попереду в порівнянні із застосуванням моделювання менеджерами для визначення політики та вивчення організаційних проблем (Harrison et al., 2007). У масштабних дослідженнях у сфері бізнесу та менеджменту домінують кількісні методи, такі як кореляційний, причинно-наслідковий і порівняльний підходи на основі опитувань (Creswell & Creswell, 2018). З огляду на його кількісні характеристики у застосуванні математичних моделей, імітаційне моделювання все ще отримує мало уваги дослідників у галузі бізнесу та менеджменту.

Існує дві методології наукового прогресу в історії, включаючи теоретичний аналіз або дедукцію та емпіричний аналіз або індукцію (Harrison et al., 2007). Набір припущень формулюється, а наслідки цих припущень потім виводяться в дедуктивній формі науки. Тим часом дослідники спостерігають за змінними (даними), а потім аналізують дані, щоб виявити зв'язки між змінними в індуктивній формі науки. Як третій спосіб займатися наукою, комп'ютерне моделювання робить нерелевантною дедуктивну проблему аналітичної нерозв'язності, що означає, що математичні співвідношення можна обробляти обчислювальними методами за допомогою чисельних методів (Аксельрод, 1997). Крім того, його власні «віртуальні» дані є переконливими в подоланні емпіричної проблеми доступності даних. Завдяки цим особливостям комп'ютерне моделювання може підтримувати

побудову теорії. Науковцям легше зробити більш реалістичні припущення, а не йти на компроміс із аналітично зручними припущеннями, що часто зустрічається в дедуктивній теорії (Levinthal & Marengo, 2016). Нарешті, інтегровані та послідовні гіпотези можуть бути створені за допомогою комп'ютерного моделювання.

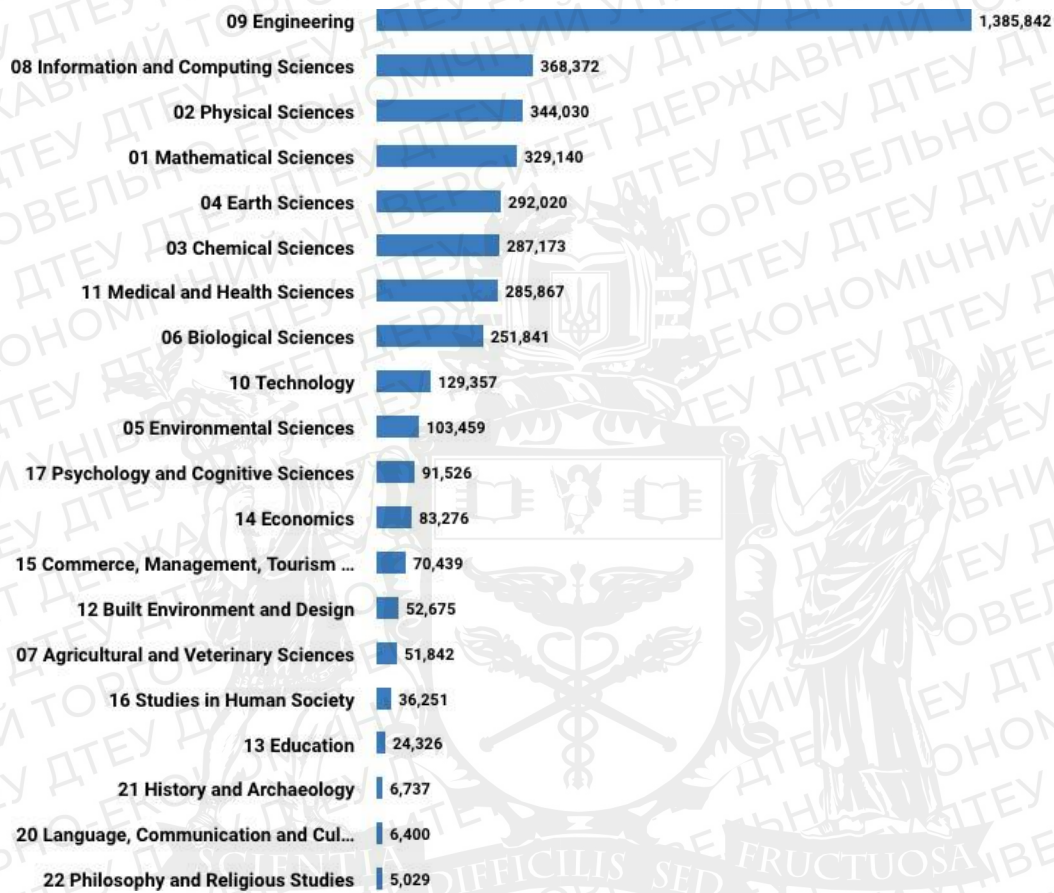


Рисунок 1.1 – Топ-20 дисциплін, в яких застосовне імітаційне моделювання найбільш часто

Таким чином, дослідження імітаційного моделювання сприяють накопиченню знань у багатьох галузях. Щоб прояснити внесок імітаційних досліджень, необхідно проаналізувати частку літератури з імітаційного моделювання. Зокрема, важливо розрахувати частку статей, заснованих на моделюванні, які з'явилися в провідних журналах різних дисциплін з 2001 по 2021 рік. Загалом існує 3 493 312 статей, пов'язаних із використанням імітаційного моделювання. Висновки узагальнено на рисунку 1.2. Імітаційне моделювання застосовується в багатьох дисциплінах, включаючи інженерію, медицину та медичні науки, освіту, технології, психологію тощо.



Рисунок 1.2 – Публікації з імітаційного моделювання 2001- 2021 роки

Як показано на малюнку 1.3, є 20 найкращих журналів, які публікують статті з імітаційного моделювання в галузі бізнесу та управління. Це найкращі журнали в цій галузі, пов'язаній з виробництвом, експлуатацією, ланцюгом постачання, наукою про прийняття рішень, стратегічним менеджментом, маркетингом, аналізом ризиків і роздрібною торгівлю. International Journal of Computer Integrated Manufacturing є провідним видавцем за кількістю змодельованих статей. Журнал із найбільшим впливом серед них – Strategic Management Journal, з 28 726 цитуваннями протягом 21 року.

Name	↓ Publications	Citations	Citations mean
International Journal of Computer Integrated ...	673	9,003	13.38
International Journal of Simulation and Proce...	660	1,595	2.42
International Journal of Production Research	517	19,198	37.13
Production and Operations Management	483	18,847	39.02
International Journal of Production Economics	440	24,855	56.49
Omega	371	16,449	44.34
System Dynamics Review	333	9,011	27.06
Production Planning & Control	266	5,740	21.58
Decision Sciences	236	10,467	44.35
Engineering Construction & Architectural Ma...	223	2,456	11.01
Strategic Management Journal	221	28,726	129.98
International Journal of Quality & Reliability ...	219	3,624	16.55
European Journal of Operational Research	203	9,746	48.01
Journal of Business Research	201	7,991	39.76
Industrial Marketing Management	201	7,597	37.80
International Journal of Operations & Product...	201	9,874	49.12
Journal of Management	192	22,060	114.90
Risks	192	628	3.27
Business Process Management Journal	188	4,171	22.19
Journal of Retailing and Consumer Services	186	4,972	26.73

Рисунок 1.3 – Топ-20 журналів з імітаційного моделювання

## 1.2 Аналіз особливостей імітаційного моделювання

Проаналізуємо особливості, а саме переваги і недоліки застосування імітаційного моделювання.

По-перше, структуру реальної системи природно відображає побудова імітаційної моделі. Відомо, що імітаційні моделі розробляються переважно з використанням візуальних мов. Таким чином, простіше повідомити внутрішні дані моделі іншим людям. Ця рефлексія зазвичай ґрунтується на спостереженнях і дослідженнях дослідників, наприклад, вирішуючи, як краще побудувати модель магазину. Блок-схема процесу, де клієнти є об'єктами, а співробітники – ресурсами моделі. Відтворюється агентська модель, де споживачі є агентами, на яких впливає реклама, комунікація та взаємодія з агентами-працівниками. Крім того, існує структура зворотного зв'язку, де продажі пов'язані з рекламою, якістю обслуговування, ціною, лояльністю клієнтів і багатьма пов'язаними факторами, які існують у магазині. Завдяки цій функції імітаційні моделі дозволяють розробникам моделей аналізувати системи та знаходити рішення там, де інші методи (наприклад, аналітичні обчислення, лінійне програмування) не дають результатів.

По-друге, рівень абстракції відповідних моделей є унікальною особливістю деяких застосувань моделювання. Самі моделі є моделями фізичного рівня, де характерно представлені об'єкти реального світу, такі як фізична взаємодія, розміри, швидкості, відстані, час, поведінка, рішення тощо. Vasudevan and Devikar (2011) стверджують, що рівень деталізації рівня абстракції, необхідний для моделювання, визначає обсяг інформації, що міститься в моделі. Кількість інформації в моделі зменшується зі зниженням рівнів абстракції, що означає, що модель абстракції низького рівня містить більше інформації, ніж модель абстракції високого рівня. Життєво важливо моделювати на найвищому можливому рівні абстракції, щоб не йти на компроміс із точністю результатів чи подальших рішень (Vasudevan & Devikar, 2011). Тому помічено, що фахівцям необхідно вибрати правильний рівень абстракції, який є життєво важливим для успіху проекту моделювання. У процесі

розробки моделі рекомендується періодично переглядати рівень абстракції. Крім того, дослідники можуть вимірювати будь-яке значення та відслідковувати будь-який об'єкт, якщо він не нижче рівня абстракції, що означає, що вимірювання та статистичний аналіз доступні в будь-який час в імітаційній моделі.

По-третє, розробка імітаційної моделі є простим процесом, і зазвичай вимагає менше інтелектуальних зусиль, є масштабованою, інкрементальною та модульною. Левінталь і Маренго (2016) стверджують, що імітаційні моделі природним чином можуть враховувати більш правдоподібні поведінкові припущення щодо агентів, ніж оптимізація корисності (або прибутку), ніж стандартні моделі рівноваги. Таким чином, поведінка системи в часі є відтворюваною та анімованою, що відомо як одна з найважливіших переваг моделювання для ілюстрації результату, дослідження взаємодій та налагодження припущень у моделі. Функції 2D і 3D є поширеними, і дослідникам цікаво переглядати та жваво представляти свої ідеї під час роботи більшості програм для моделювання.

Хоча технологія є критично важливим інструментом для реалізації та запуску моделей, у деяких випадках вона також обмежує обчислювальні можливості через обмеження на швидкість обробки, зберігання та функції програмування. Це перше обмеження імітаційного моделювання. Наприклад, моделювання на основі агентів містить активні об'єкти (люди, бізнес-єдиниці, тварини, транспортні засоби, проекти, акції, продукти тощо) із часом, порядком подій та іншою індивідуальною поведінкою. Для такого типу системи багато інструментів не можуть ефективно розробляти агентів і підтримувати повну міграцію від застарілих фондових і блок-схем або блок-схем процесів до агентів через відсутність системи компетентності.

Друге обмеження імітаційного моделювання полягає в рівні складності моделі. Зазвичай імітаційна модель будується шляхом поєднання простоти та деталізації (Harrison et al., 2007). Щоразу, представляючи імітаційну модель, мається на увазі, що найчастіше виникає запитання: «Чому б вам не додати змінні А, В, С до моделі?». З одного боку, модель стає більш реалістичною, додаючи якомога більше змінних або процесів. З іншого боку, також стає надто складно зрозуміти, що відбувається, і керує результатами в моделі з вищим складним рівнем.

Нарешті, цінність результатів моделювання залежить від достовірності імітаційної моделі. Виконуючи дослідження, розробники імітаційного моделювання намагаються оцінити поведінку моделі в ряді умов у технічно складних і чутливих до помилок комп'ютерного програмування. Таким чином, дані, отримані шляхом моделювання, не повністю відображають реальні спостереження та обмежені методами аналізу. Ці дані слід інтерпретувати з обережністю та додатковою кваліфікацією при узагальненні результатів моделювання на області простору параметрів, які не досліджувалися під час моделювання.

### **1.3 Інформаційні технології імітаційного моделювання**

Зважаючи на рівень абстракції моделі та загальну структуру для відображення системи реального світу на її модель, можна виділити три основні типи імітаційних моделей які моделюють засобами сучасних інформаційних технологій. Системна динаміка в основному використовується для стратегічного моделювання на високому рівні абстракції, а саме відтворення черги в магазині, розповсюдження нового продукту компанії. При середній та середньо-низькій абстракції моделювання дискретних подій із базовим процесоцентричним підходом застосовується для процесу зняття грошей у банку, робочого цеху на виробничій компанії або процесу вступу на факультет університету тощо. Агентна модель є більш гнучкою з точки зору абстракції; наприклад, вона може бути дуже детальною, коли агенти моделюють фізичні об'єкти, до дуже абстрактного, коли агентами є конкуруючі компанії чи уряди. Крім того, існує четвертий тип імітаційної моделі, який об'єднує типи, згадані вище, в одну модель, що називається моделлю кількох методів і широко застосовується в багатьох дисциплінах.

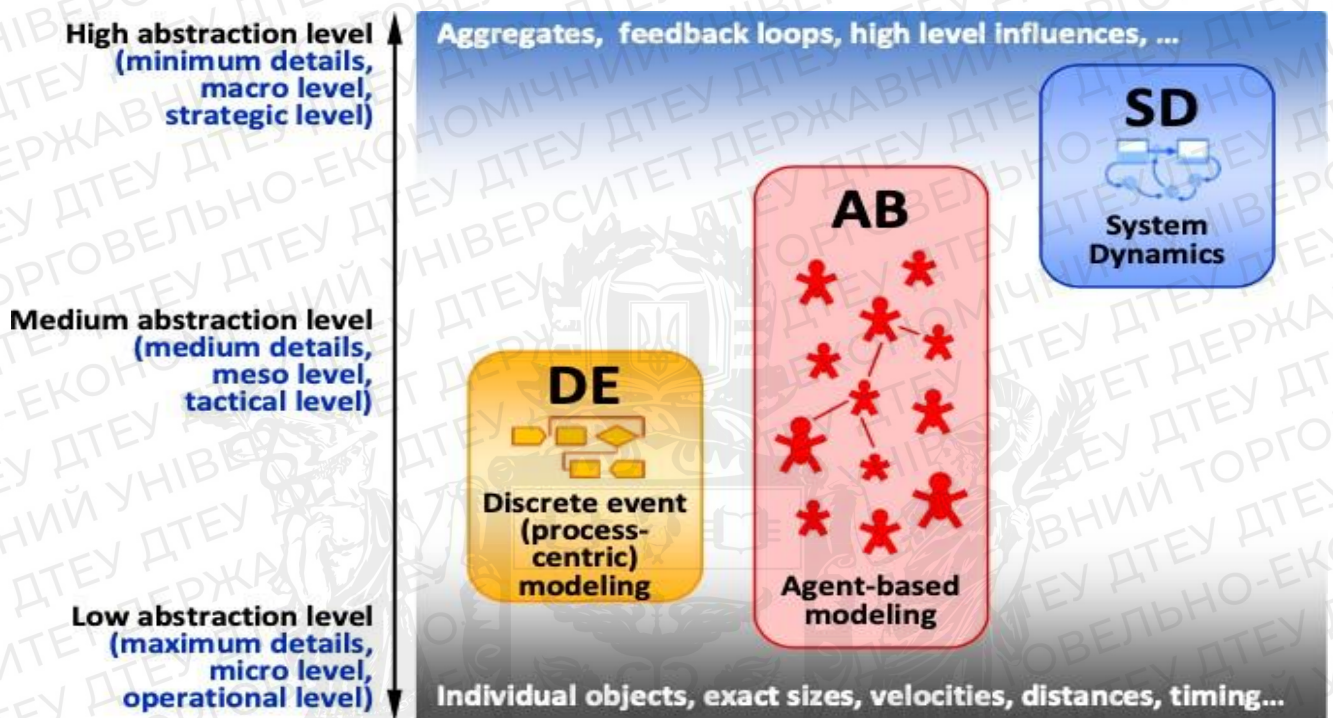


Рисунок 1.4 – Три типи імітаційного моделювання

Системна динаміка — це метод, створений у 1950-х і на початку 1960-х років професором Массачусетського технологічного інституту Джеєм Райтом Форрестером, який спочатку займався наукою та технікою. Він відкрив галузь системної динаміки, яка досліджує складні ділові, економічні та екологічні системи, а несподівані зворотні зв'язки впливають на людську діяльність, що створюється в них. Системна динаміка — це метод дослідження динамічних систем з ендогенної точки зору.

Моделювання системи розглядається як причинно-замкнена структура, яка сама по собі визначає свою поведінку. Петлі зворотного зв'язку або циклічна причинність є серцевиною динаміки системи, як показано на малюнку 1.5, який базується на моделі дифузії Басса. Це допомагає ідентифікувати запаси або накопичення, які є потенційними користувачами та учасниками моделі для

прикладу, а також потоки, які на них впливають. Запаси - це пам'ять системи та джерела нерівноваги. У цьому методі окремі події та рішення розглядаються як поверхневі явища, які ґрунтуються на структурі та поведінці системи, що дає змогу розробникам моделей бачити речі з певної точки зору безперервного перегляду, де події та рішення розмиті (Sterman, 2000) . З точки зору математики, модель динаміки системи – це система, що складається з диференціальних рівнянь. Є дві важливі характеристики моделювання системної динаміки. По-перше, модель працює лише з агрегатами, що означає, що елементи в тому самому складі нерозрізнені; вони не мають індивідуальності. По-друге, фахівець повинен надати глобальні структурні залежності для точного кількісного визначення даних для них.

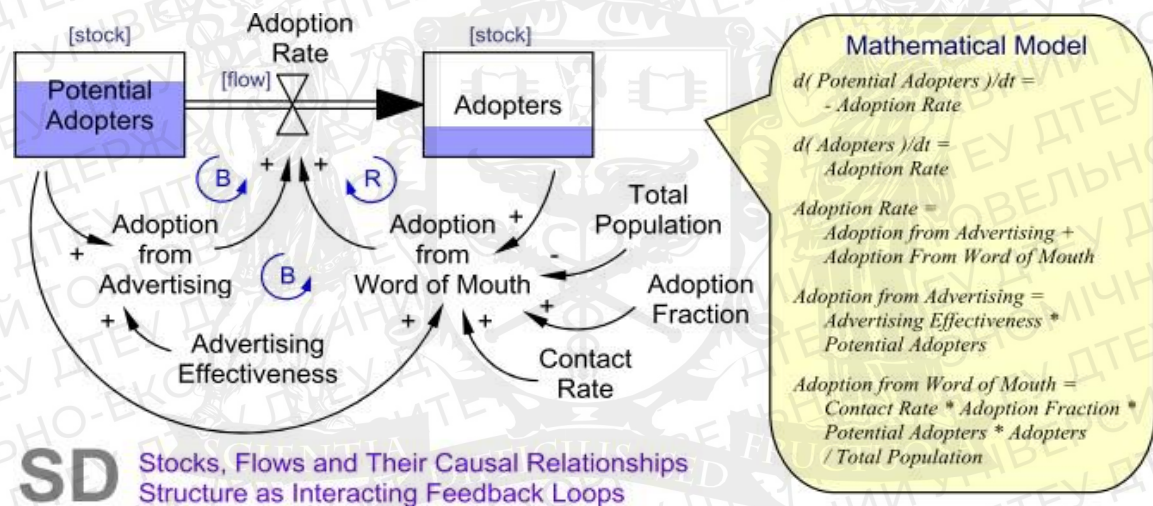


Рисунок 1.6 – Приклад системної динаміки

Моделювання дискретних подій було представлено в жовтні 1961 року інженером IBM Джеффри Гордоном як першу версію GPSS (програмова симуляційна система Гордона), яка є першим методом програмної реалізації моделювання дискретних подій. Суть методу моделювання дискретних подій полягає в тому, що система моделюється як процес, який є послідовністю операцій, що виконуються між об'єктами. Процес зазвичай включає затримки, використання ресурсів і очікування в чергах. У моделі дискретних подій кожна операція вказується графічно як блок-схема процесу, що містить початкову та кінцеву події, і жодні зміни не можуть відбутися в моделі між будь-якими двома дискретними



подіями. Динаміка світу безперервна через відсутність миттєвих змін і атомних змін. Кожну зміну в реальному світі можна додатково розділити на фази процесів, рисунок 1.7.

Наприклад, компанія набирає нових продавців відповідно до п'ятиетапного процесу відбору Jobber and Lancaster (2017), включаючи (1) підготовку опису посади, (2) визначення ресурсу найму, (3) підготовку короткого списку, (4) співбесіда та (5) використання додаткових засобів відбору. Залежно від рівня абстракції та призначення моделі, використання кожного кроку в грошовій формі або кількості співробітників можна використовувати в цій моделі як миттєві події. Деталі їхніх компонентів можуть бути нерелевантними, оскільки лише важливі моменти в житті системи розглядаються та розглядаються як миттєві та атомарні події та абстрагуються від усього, що відбувається між двома суміжними подіями в моделюванні дискретних подій.

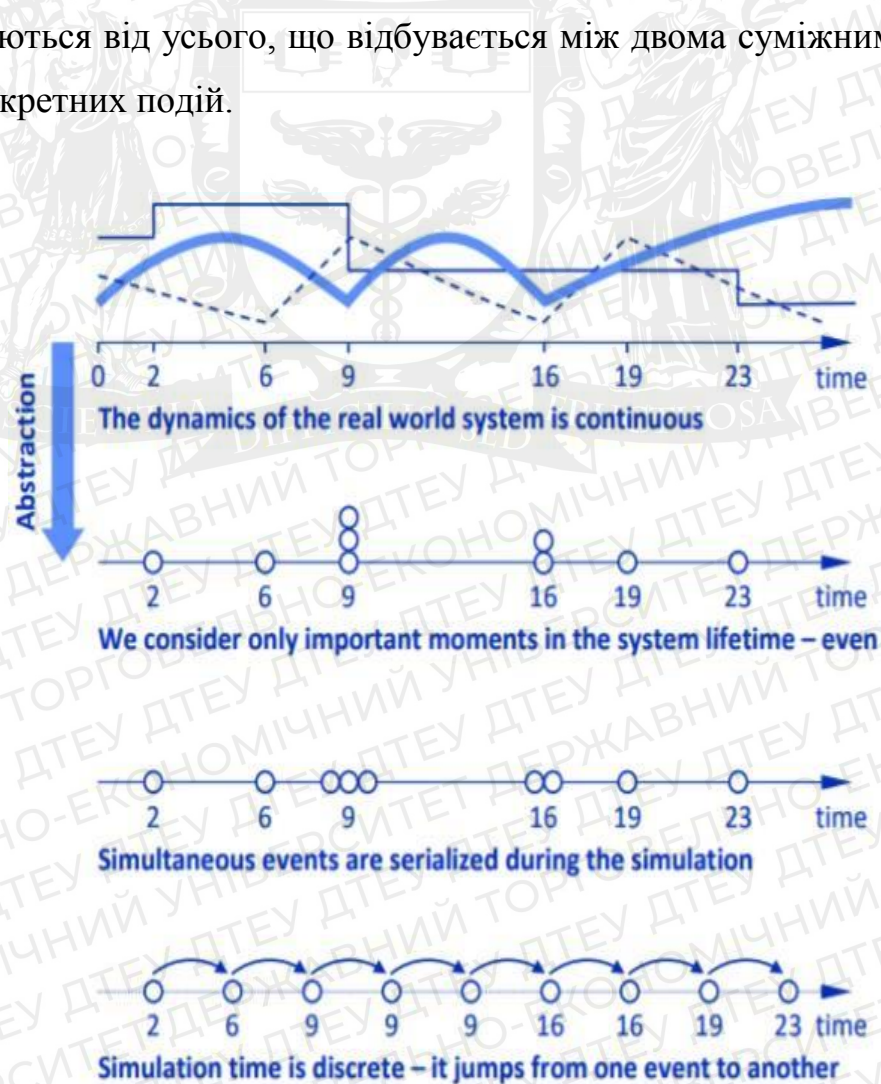


Рисунок 1.7 – Моделювання дискретних подій

Започатковане в 2002-2003 роках моделювання на основі агентів використовується для моделювання поведінки адаптивних акторів, які складають соціальну систему та впливають один на одного через свою взаємодію (Harrison et al., 2007). Даний метод створений для глибшого розуміння систем, які погано охоплюються традиційними підходами до моделювання, такими як системна динаміка та дискретні події.

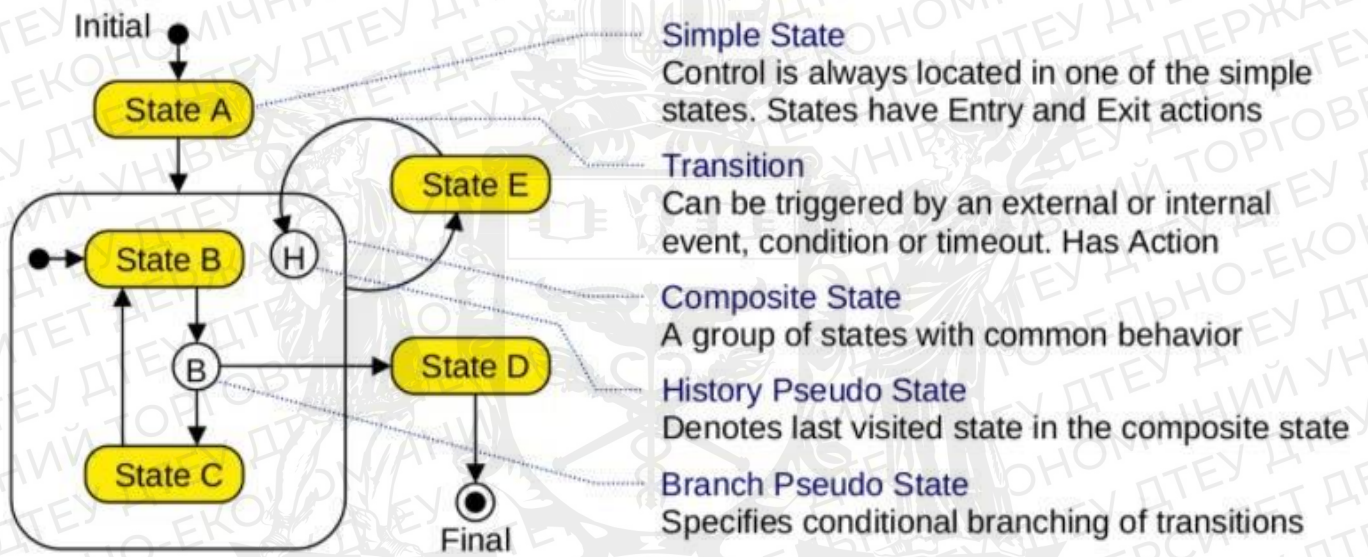


Рисунок 1.8 – Типова діаграма станів

Цей метод створено завдяки прогресу в технології моделювання, отриманому в інформатиці, і швидкому зростанню доступності потужності ЦП і пам'яті завдяки широкому використанню графічних редакторів або сценаріїв для ілюстрації різноманітної поведінки агентів. У моделі, заснованій на агенті, агент зазвичай має уявлення про стан, а його дії та реакції залежать від його стану, поведінка якого визначається діаграмами станів.

Найвідоміші програми з імітаційного моделювання: HSC Chemistry, ProcessModel, ExtendSim CP, Simcad Pro, Simio, FlexSim, PaleBlue, AnyLogic, Simul8, AutoTurn, Arena, Hash, Haulsim, Simile, Simulation Modeling.



## 2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОБОТИ КВИТКОВИХ КАС

### 2.1 Специфіка функціонування квиткових кас

Сьогодні багато залізничних квитків купують онлайн або через мобільні додатки, а електронні квитки були прийняті для багатьох послуг (наприклад, приміського сполучення). Тому використання традиційних квиткових кас і навіть автоматів з продажу залізничних квитків на вокзалах зменшується. Тим не менш, важливо моделювати пасажиропотік у пікові моменти або дати перед вікнами кас залізничного вокзалу. Це може покращити сервіс і, отже, задоволеність клієнтів. Його також можна застосовувати в інших середовищах.

Поширеною проблемою в квиткових касах є ситуація, коли пасажир намагається купити квиток на далеку поїздку на якомусь головному вокзалі. Він дуже нервує, бо черги до двох міжміських вікон великі.

Це далеко не поодинокий випадок: мандрівники час від часу просять пройти до каси без черги, бо інакше вони спізняться на поїзд. Час від часу черги біля інших вікон можуть бути порожні, а працівники, які їх обслуговували, люб'язно кричали, просячи мандрівників, які поспішали, підійти до їхніх вікон.

До проблеми традиційної квиткової каси можна підійти шляхом проектування та впровадження віртуальної машини, яка «продає» квитки всім пасажиром (хоча вони знаходяться в унікальній віртуальній черзі, незалежно від типу поїзда, вони обслуговуються відповідно до своїх характеристик). Порядок прибуття дотримується, але кожен віртуальний пасажир розподіляється відповідно до найкращої можливої черги (найкоротшої) відповідно до його характеристик.

## 2.2 Розробка діаграм взаємодій

Опишемо процес роботи квиткової каси та побудуємо діаграму взаємодії окремих агентів системи.

(1) Необхідно вказати час початку симуляції та її тривалість.

(2) Потік пасажирів, що прибувають, визначається відповідними розподілами (кривими прибуття), які залежать від типу поїзда та його розкладу. У цій реалізації для залізничних станцій кінцевий користувач має дві можливості:

«Середовище реального життя»: дані про прибуття пасажирів для кожного поїзда вводяться за допомогою списків, що містять кількість пасажирів, які прибувають щохвилини та купують квиток у квитковій касі. Прибуття віртуальних пасажирів для певного поїзда залежатиме від довжини наданого списку: він почнеться «довжиною списку» за кілька хвилин до часу відправлення (розрахунок, який виконується всередині). (Внутрішній) список відправляючих поїздів, які слід враховувати в симуляції (TrainInput), пізніше оновлюється користувачем за допомогою процедури addTrain один раз для кожного нового заявленого поїзда.

Якби програмне забезпечення використовувалося компанією залізничної інфраструктури на реальній станції, потрібно було б провести опитування, щоб визначити реальні криві прибуття на цю станцію, щоб скласти відповідні списки пасажирів, які купують квитки.

«Середовище тестування»: дані про прибуття пасажирів кожного поїзда (який купує квиток у квитковій касі) генеруються за допомогою статистичного розподілу, щоб визначити затримку кожного пасажирів відносно момент, коли починається симуляція цього поїзда. Для цього за замовчуванням вибрано мультиноміальний розподіл з параметрами  $n$  і  $p$ . У цьому випадку  $p = (p_1, \dots, p_r)$  відповідає вибраним можливим затримкам, а  $n$  є кількістю пасажирів, змодельованих для цього поїзда. Цей вибір не ґрунтується на експериментах у реальному світі й має лише на меті легко перевірити пакет для перевірки та показати, як він працює

Значення, призначені за замовчуванням, становлять 30 хвилин наперед для поїздів приміського сполучення; 60 хвилин наперед для поїздів середнього та далекого сполучення; і за 90 хвилин для високошвидкісних поїздів (хоча це можна

змінити, змінивши значення глобальної змінної `randomLength` у файлі `randomize.mpl`).

(3) Дані потягів вводяться залежно від вибраного середовища.

«Реальне середовище»: «номер» поїзда, його тип, час відправлення та список пасажирів, які купують квиток, щохвилини вводяться вручну для кожного поїзда (за допомогою процедури `addTrain`). Кількість пасажирів отримується з відповідного списку кроку 2.

«Середовище тестування»: дані для поїздів (час відправлення, кількість пасажирів, яка буде згенерована, і «номер» поїзда) вводяться за допомогою чотирьох списків (`SuburbanTrain`, `MDTrain`, `LDTrain` і `HSTrain`), і процес виконується автоматично.

(4) Має бути введено розподіл вікон і час обслуговування для кожного типу поїзда, а також час для перенаправлення пасажирів до черги в останню хвилину (якщо є). Змінні, у яких вони мають зберігатися, це приміські, середні, міжміські та високошвидкісні (якщо вікно є спільним, воно відображається в кількох із цих списків, і застосований середній час обслуговування залежатиме від типу пасажирів). Особливий випадок становлять вікна в останню хвилину (якщо є). «Хвилини до відправлення», необхідні для перерозподілу в такому вікні, зберігаються в глобальній змінній сигналізації, а вікна, які обслуговують цей тип пасажирів, повинні бути введені в список останніх хвилин (час обслуговування також залежатиме від типу пасажирів) і буде дано за ці вікна).

(5) Кожну хвилину всі пасажирів, які прибувають, тимчасово зберігаються в «черзі прибуття» (віртуально неіснуюча єдина черга).

(6) Щохвилини пасажирів в «черзі прибуття» переміщуються до найкращої з можливих черги вікон (найкоротшої) відповідно до їхніх характеристик (враховуючи, чи є вони пасажирів в останню хвилину, якщо таке вікно існує). Щоб досягти цього, список вікон скорочується для кожного пасажирів, і він/вона спрямовується до найкоротшого вікна у скороченому списку (у разі наявності більше ніж однієї черги однакової довжини, він/вона спрямовується до найкоротшого вікна у скороченому списку).

(7) Кожне вікно в квитковій касі працює з певною швидкістю розвантаження (враховуючи середній час, який вимагає тип пасажирів), а також оновлюється щохвилини (виключаючи з кожної черги вікон уже обслужених пасажирів). Таким чином, вихідний потік пасажирів із черг біля вікон складається з пасажирів, які вже мають квитки.

(8) Щохвилини система шукає пасажирів в останню хвилину в чергах до вікон (якщо застосовно) і переміщує кожного до найкоротшої черги в останню хвилину (якщо і тільки якщо ця черга коротша за ту, в якій стоїть пасажир).

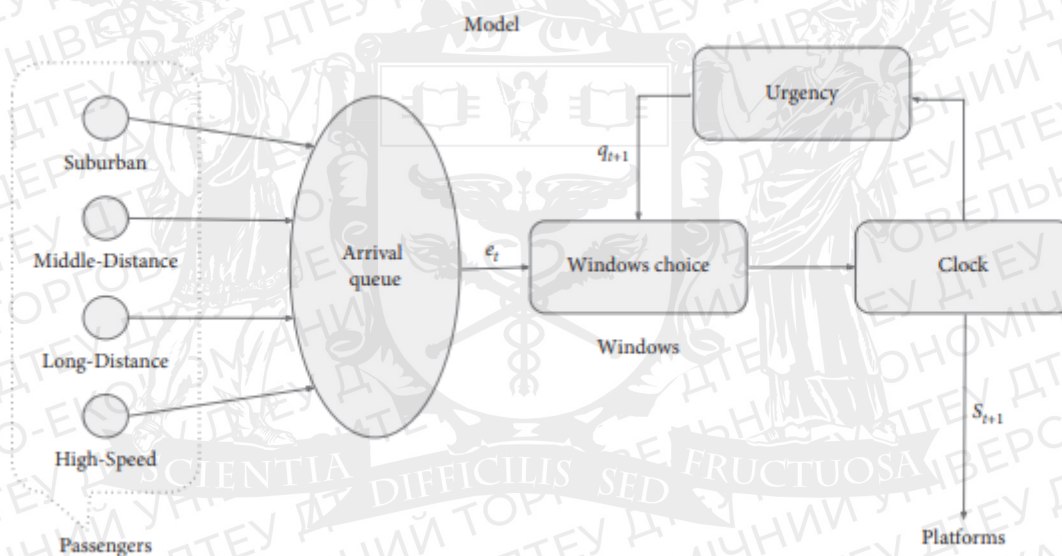


Рисунок 2.1 – Діаграма взаємодії агентів системи

## 2.3 Розробка імітаційної моделі роботи квиткових кас

Сформулювавши задачу, можна описати модель і динаміку квиткової каси великого вокзалу.

Розглядаються наступні елементи (обчислювальні деталі вхідних даних детально описано в прикладах нижче):

Пасажири: внутрішньо описаний списком у форматі

[тип і номер поїзда, час прибуття, штат] Такий список автоматично формується пакетом для кожного прибулого пасажира. «Час прибуття» відповідає до прибуття пасажира на залізничний вокзал. The стан — час, необхідний (або залишився) для отримання квитка.

Потяг: внутрішньо описаний списком у форматі

[час відправлення, кількість пасажирів, номер поїзда]

Списки розповсюдження та обслуговування Windows: кінцевий користувач має ввести список для кожного типу поїзда, що обслуговується, у форматі:

[набір ідентифікаторів вікон, середній час обслуговування]

Вікно: внутрішній список пасажирів (очікують у черзі цього вікна квиткової каси).

Змінна часу позначається як  $t$ .

$e(t)$  – віртуальна «черга прибуття» пасажирів, тобто список усіх пасажирів, які вже прибули на час  $t$  (з їх характеристиками), побудований відповідно до кривих прибуття кожного поїзда.

$q(t)$  – це «стан вікон»: це список черг перед вікнами в момент часу  $t$ . Зверніть увагу, що через дискретний характер процесу пасажири в цьому стані чекали принаймні один часовий крок у черзі прибуття, тобто залишалися в  $e(t-1)$ , перш ніж перейти до  $q(t)$ .



Вибір вікна: пасажирів в  $e(t)$  обирають (один за одним) вікно з найкоротшою чергою в  $q(t)$  (з тих, що йому підходять). Вузол повертає оновлений список вікон, які увійдуть до годинника переходу.

$s(t)$  — список пасажирів, які вже мають квитки (і можуть перейти на відповідні платформи).

Годинник: він пересуває  $e$ ,  $q$  і  $s$  на один часовий крок (1 хвилина за замовчуванням):

Оновлення  $e(t)$  до  $e(t + 1)$ , шляхом стирання тих пасажирів, які рухаються до черг біля вікон, і додавання тих пасажирів, які прибувають на станцію

Оновлення  $q(t)$  до  $q(t + 1)$ , видалення з кожної черги тих пасажирів, які отримали квитки, і додавання тих, хто прийшов із черги прибуття

Оновлення  $s(t)$  до  $s(t + 1)$ , список, що включає пасажирів, які отримали квитки на хвилину  $t$

Терміновість: ця позначка дозволяє пасажирам, які потрапляють у категорію «останньої хвилини», вибрати це вікно (якщо воно існує).

Можливе існування вікон в останню хвилину робить вибір вікна більш складним (рис. 2.1). Вибір пасажирів в останню хвилину дає пріоритет часу відправлення над типом поїзда. Вони якимось чином порушують порядок основної черги.

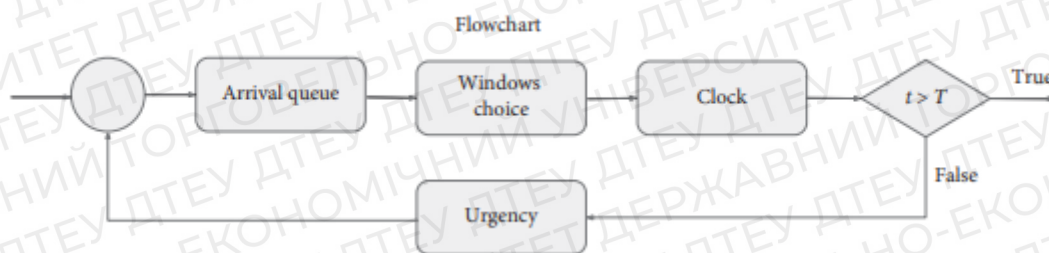


Рисунок 2.1 – Діаграма взаємодії черги пасажирів

## 3 РЕАЛІЗАЦІЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ РОБОТИ КВИТКОВИХ КАС

### 3.1 Специфіка побудови імітаційних моделей

Одним із основних доступних методів моделювання є моделювання дискретних подій (DES), яке фокусується на самому процесі та моделює його. DES базується на концепції зв'язків і ресурсів для опису їх потоку та спільного використання в системі. Сутності є пасивними об'єктами (до них не прив'язано жодної взаємодії чи характеристик), і вони подорожують робочим процесом, де обробляються, затримуються, ставляться в чергу, захоплюються та розподіляються. Першим відомим інструментом моделювання будівництва з використанням DES була CYCLic Operations Network (CYCLONE) Хелпіна, розроблена в 1973 році, яка мала бути системою моделювання загального призначення (AbouRizk та ін., 2011). Мартінез (2010) описав методологію проведення DES і вказав на можливі проблеми, з якими можна зіткнутися під час моделювання, які можуть поставити під загрозу валідність моделі. Тривалість діяльності в моделях DES можна описати за допомогою функцій розподілу ймовірностей, таких як ті, що використовуються в техніці оцінки та перегляду програм (PERT). Ло (2015) спробував зібрати всі доступні функції (від уніфікованих до Вейбулла, включаючи системи Джонсона та Пірсона) з їхніми властивостями та пояснив їх використання у випадку моделювання. AbouRizk і Halpin (1992, стор. 537) припускають, що гнучкі функції необхідні через «диверсифікований характер даних про тривалість будівництва» і радять використовувати бета-функцію через її звичність у сфері будівництва.

Хайду та Бокор (2016) стверджують, що ретельна трибальна оцінка важливіша, ніж тип обраної функції розподілу. Моделювання методом Монте-Карло, виконане на гіпотетичних і реальних проектах, показало, що 10% різниця в оцінці за трьома точками викликає більші відхилення, ніж вибрані розподіли (Hajdu and Bokor, 2016). Іншим основним методом моделювання є системна динаміка (SD), оскільки розроблений Форрестером (1961). SD – це метод «зверху вниз», який зосереджується на різних факторах впливу та взаємозв'язках між ними, щоб показати роботу та поведінку всієї системи за допомогою циклів зворотного зв'язку.

SD можна використовувати як для якісного, так і для кількісного моделювання: перше зосереджується на створенні діаграми причинно-наслідкових зв'язків (врівноваження та підсилення зв'язків), тоді як друге визначає запаси та потоки та виражає зв'язки за допомогою рівнянь (Kunc, 2017). SD — це модель, яка працює з агрегатами, тобто елементи в одному запасі вважаються однаковими, а система визначається як набір структурних залежностей. Модеслі та Аль-Джібурі (2009) використовували SD для визначення сфер, які керівництво має вдосконалити для підвищення продуктивності. Модель містила планування, контроль, мотивацію, безпеку та зриви як найбільш значущі фактори. Було перевірено кілька стратегій, і було виявлено, що перші два фактори потребують особливої уваги керівництва (Mawdesley and Al-Jibouri, 2009). На відміну від SD, агентне моделювання (ABM) має підхід «знизу вгору» – існує відсутність глобальної поведінки системи.

Поведінка системи залежить від того, як окремі гетерогенні агенти взаємодіють один з одним і з їхнім середовищем на основі визначених правил. Зіберс та ін. (2010) стверджують, що ABM має перевагу перед DES у випадках, коли фокус зосереджується не на процесі, а на тому, як окремі агенти, які можуть навчатися та адаптуватися, впливають на систему. Сон та ін. (2015) підкреслюють подібні позитивні властивості через приклади проектних команд у великомасштабних будівельних проектах. Вони рекомендують ABM для моделювання, наприклад, міжнародного будівельного ринку з країнами та фірмами як агентами (Son et al., 2015). Sawhney та ін. (2003) радять використовувати ПРО для підвищення безпеки будівництва на місці шляхом моделювання будівельного середовища, працівників з різними рівнями толерантності до ризику (агентів) і методів управління безпекою. Watkins та ін. (2009) використовували ABM, щоб визначити, як перевантаженість сайту впливає на продуктивність із визначенням двох типів агентів: робітники (зі змінними, такими як рівень кваліфікації) і діяльність. Дабірян та ін. (2016) застосували ті самі два агенти, щоб краще оцінити витрати на робочу силу. Хсу та ін. (2016) використовували ABM для оцінки моделей відбору членів команди. У їхніх дослідженнях агентами були працівники з такими

атрибутами, як досвід і навички. Було зроблено висновок, що вибір на основі взаємозалежності є кращим, ніж призначення на основі навичок (Hsu et al., 2016).

Підходи, описані тут, часто використовуються окремо, але також можуть застосовуватися в поєднанні. Перевага комбінованого підходу полягає в тому, що можна використати різноманітні переваги кожного методу та збалансувати їхні недоліки. Для кожного компонента моделі слід вибрати найбільш підходящий підхід, і, залежно від питання, на яке потрібно відповісти, такі комбінації забезпечать точніші представлення реальності.

Бокор та ін., Огляд підходів моделювання будівництва 1855 Для цих комбінованих підходів існують різні назви, включаючи «гібридне», «багатометодне» та «багатопарадигмальне» моделювання (Mustafee та ін., 2015). Мостерман (1999) визначив поєднання дискретного та безперервного моделювання як «гібридне моделювання». Балабан та ін. (2014) стверджують, що ПРО не можна вважати парадигмою; отже, ті підходи, де АВМ поєднується з іншим методом, не можна назвати мультипарадигмальним. Згідно з ними, також існує відмінність між змішаними/гібридними та мультиметодами (Balaban et al., 2014). Обидва Mustafee та ін. (2015) і Balaban et al. (2014) погоджуються, що необхідні правильні визначення. Крім того, три основні методи моделювання можна змішувати з іншими методами, такими як нейронні мережі (NN) або нечітка логіка (FL) (Balaban et al., 2014), які також можуть бути розглянуті гібридні підходи (AbouRizk, 2010; Nojedehi and Nasirzadeh, 2017). Однак у цьому документі термін «гібридне моделювання» відноситься до будь-якого методу, в якому базовий метод моделювання поєднується з іншим базовим методом моделювання або FL.

Після вибору найбільш підходящої структури необхідно визначити точки взаємодії між компонентами. Ці змінні інтерфейсу можуть впливати на змінні в іншому компоненті. Створення гібридних моделей надає можливість мати динамічні змінні, які інакше були б статичними за допомогою базового методу моделювання (Alvanchi et al., 2011). Крім того, застосування гібридного підходу може означати поєднання безперервного (наприклад, SD) і дискретного (наприклад, DES) методу, що означає, що має бути визначено часове випередження (Alvanchi та ін., 2011;

Alzraiee та ін., 2012). ). Тому важливо знати, як можуть змінюватися взаємодіючі змінні через зв'язування компонентів гібридної системи. За даними Alvanchi et al. (2011), існує п'ять типів взаємодії: у випадку однієї дискретної змінної та однієї безперервної змінної дискретна зміна дискретної змінної спричиняє дискретну зміну безперервної; дискретна зміна дискретної змінної змінна викликає зміну функціонального опису безперервної; і безперервна зміна безперервної змінної викликає дискретну зміну дискретної. У випадку двох безперервних змінних, безперервна зміна однієї безперервної змінної викликає безперервну зміну іншої. У випадку двох дискретних змінних змінних, дискретна зміна однієї дискретної змінної викликає дискретну зміну іншої.

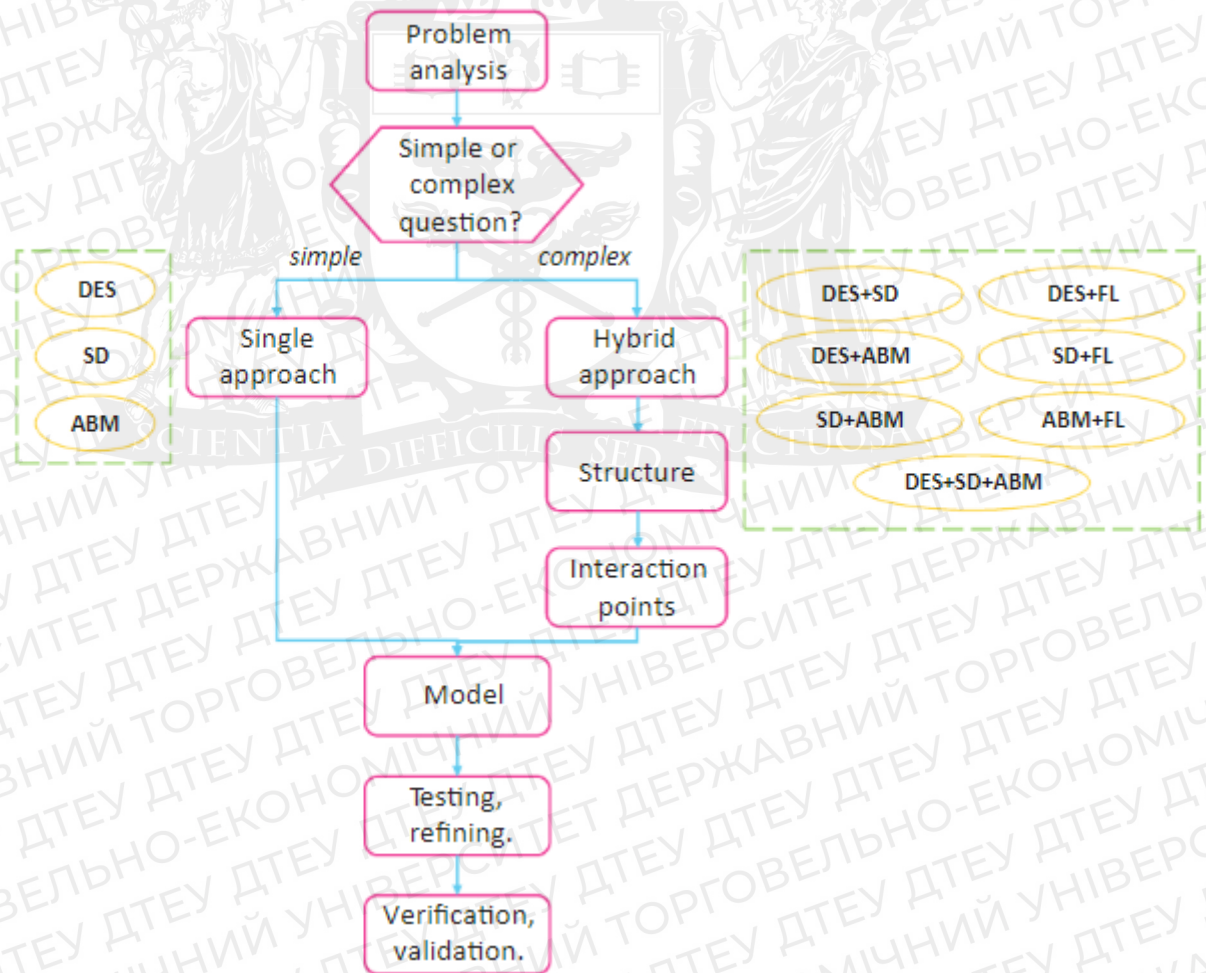


Рисунок 3.1 – Схема побудови імітаційної моделі

### 3.2 Реалізація імітаційної моделі в середовищі AnyLogic

Пішохідна бібліотека AnyLogic призначена для імітації пішохідних потоків у «фізичному» середовищі. Дозволяє створювати моделі пішохідних будівель (наприклад, станції метро, перевірки безпеки тощо) або вулиць (велика кількість пішоходів).

Бібліотека Pedestrian Library дозволяє створювати гнучкі моделі, збирати базову та розширену статистику та ефективно візуалізувати процес, який ви моделюєте, щоб перевірити та представити свою модель. Ви можете збирати статистичні дані щодо щільності пішоходів у різних зонах, щоб забезпечити прийнятну роботу точок обслуговування з гіпотетичним навантаженням, оцінити тривалість перебування в конкретних зонах, виявити потенційні проблеми з внутрішньою геометрією — ефект додавання перешкод і багато інших застосувань. У моделях, створених за допомогою Pedestrian Library, пішоходи рухаються в безперервному просторі, реагуючи на різні типи перешкод (стіни, різні види зон) та інших пішоходів.

Дана бібліотека вдало моделює і процес проходження пасажирів через квиткову касу.

На рисунку 3.2 зображено побудову вокзалу із квитковими касами за допомогою графічних примітивів AnyLogic.

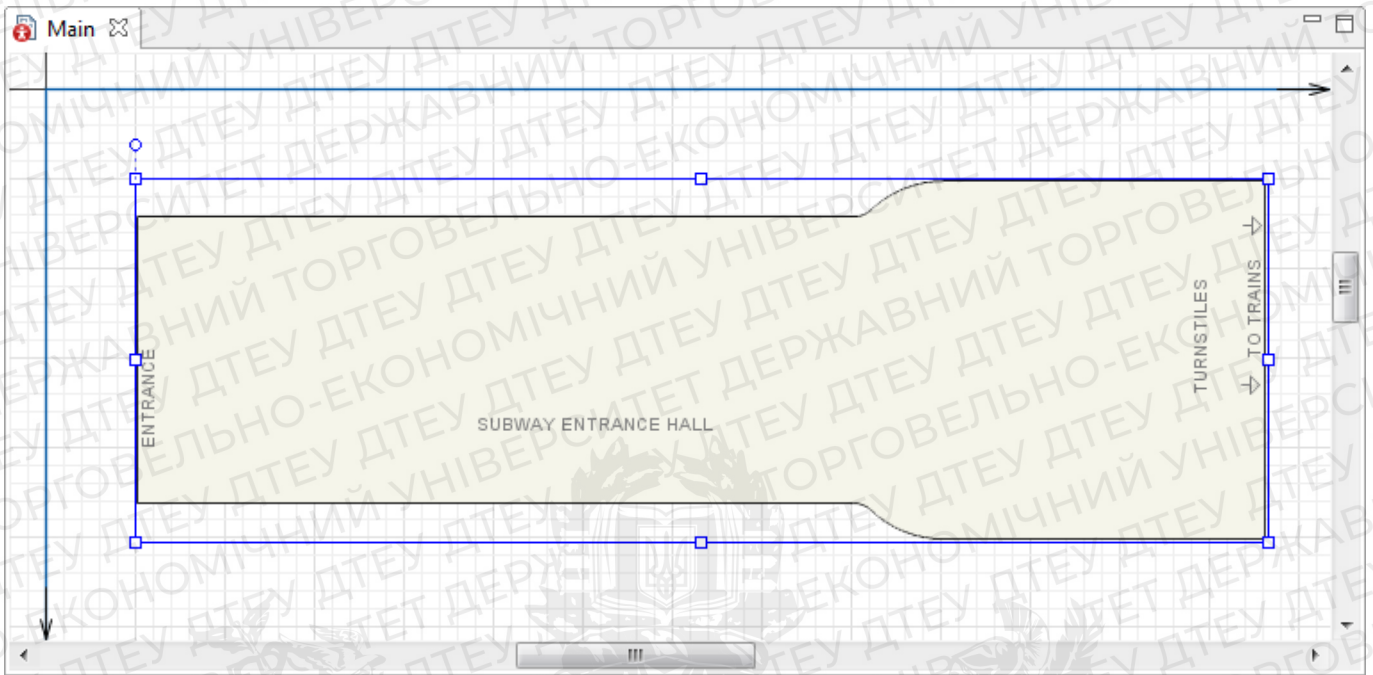


Рисунок 3.2 – Процес побудови вокзалу

Зараз ми завершимо створення простої моделі, що моделює пасажиропотік. Ми визначимо процес пішохідного потоку за допомогою блок-схеми, складеної з блоків пішохідної бібліотеки.

Ми почнемо з дуже простого процесу: пасажир заходить на станцію метро (саме там, де ми поставили лінію входу), а потім переходять до потягів (до нашої цільової лінії).

В AnyLogic є можливість створити блок-схеми, додаючи блоки з бібліотечної палітри до графічної діаграми, встановлюючи спеціальні властивості для блоків і з'єднуючи блоки разом.

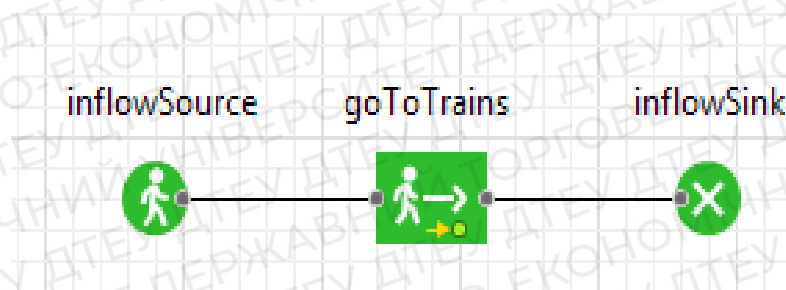


Рисунок 3.3 – Процес побудови агентів та окремих елементів діаграми взаємодії

Надалі потрібно буде створити карту щільності розподілу. Елемент виконує роль колірної схеми. Під час виконання буде показано легенду карти щільності. Ця легенда карти щільності допомагає зрозуміти, які кольори на карті щільності означають які значення. Легенда відображає відповідність між значеннями щільності та кольорами на карті щільності.

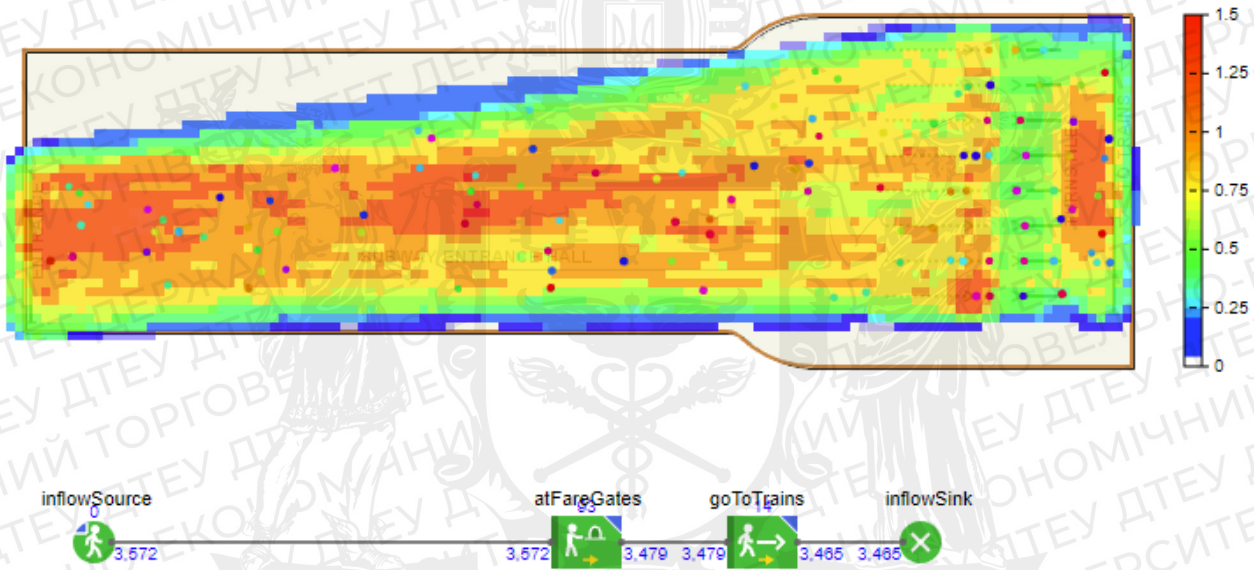


Рисунок 3.4 – Створення карти щільності

Карта щільності постійно перефарбовується відповідно до фактичних значень: коли щільність змінюється в якійсь точці, колір динамічно змінюється, щоб відобразити цю зміну. При нульовій щільності ділянка не забарвлюється взагалі.

Карта щільності зазвичай використовується для визначення областей з критичною щільністю. Червоним кольором позначена критична щільність пасажирів в черзі. За замовчуванням AnyLogic використовує логарифмічну схему кольорів. У цьому випадку колір змінюється логарифмічно від «мінімального» (синього) кольору до «максимального» (червоного) кольору.



Ця колірна схема часто використовується, коли потрібно звернути увагу лише на значення щільності, близькі до порогу критичного значення. Є можливість змінити логарифмічну колірну схему на лінійну, вибравши параметр «Лінійна» в параметрі «Карта щільності».

На даний момент всі пасажирів в нашій моделі заходять у вхідну будівлю метро, потім проходять через тарифні ворота і йдуть до потягів. Тому ми припускаємо, що всі пасажирів купили квитки заздалегідь. Насправді це навряд чи може бути правдою. Деякі люди можуть зайти на станцію з квитками, купленими заздалегідь. Але багато хто купує квитки просто при вході в метро.

На станції можуть бути різні пункти продажу квитків. У маленьких входах метро можуть бути тільки автомати з продажу квитків, на великих і просторих станціях також є каси.

Розширимо нашу модель, спершу додавши автомати з продажу квитків. Побудувавши таку модель, ми хочемо знати кількість кас, які нам потрібні, щоб задовольнити потреби пасажирів, а також ми можемо знайти оптимальне розташування машин, щоб мінімізувати пасажиропотоки, перехрестя та натовпи.

Як і тарифні ворота, автомати з продажу квитків також можуть бути природно представлені як послуги з лініями.

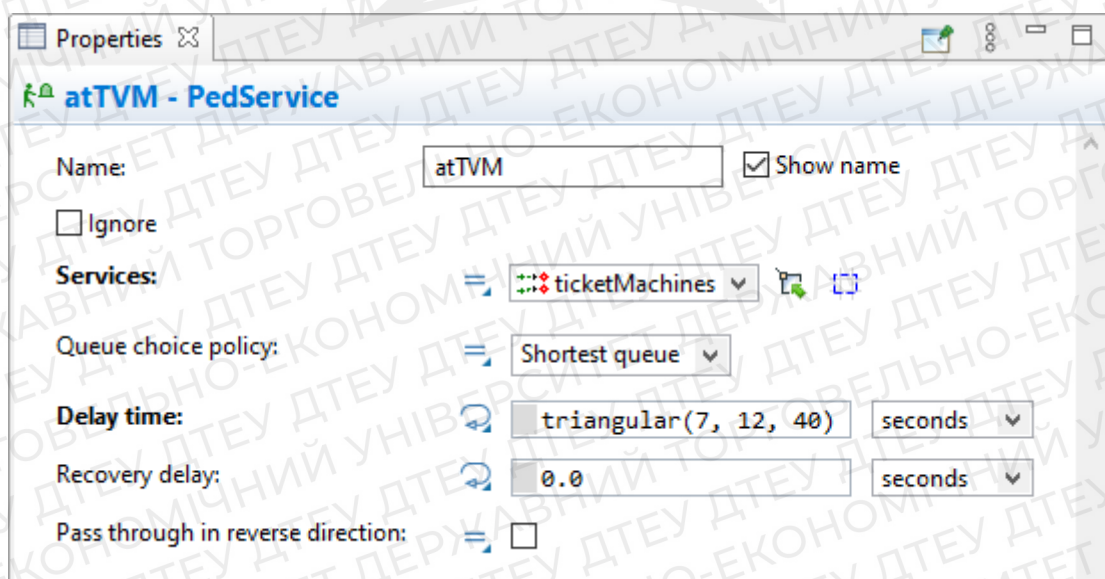


Рисунок 3.5 – Встановлення часу затримки в черзі

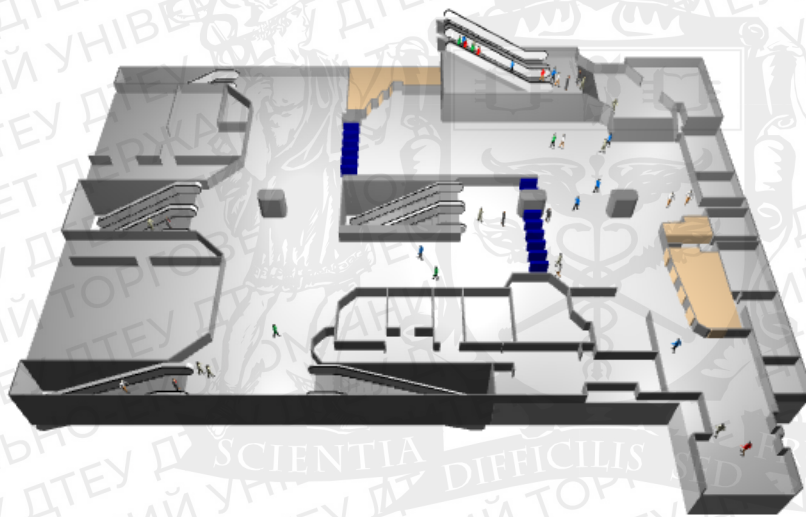
### 3.3 Проведення оптимізаційного експерименту

Проведемо оптимізаційний експеримент розробленої системи, шляхом тестування квиткової каси у різних режимах, притому змінюючи швидкість імітаційної моделі в налаштуваннях. Якщо всі режими працюють коректно, то розробка є повністю успішною. Результати тестування наведені на рисунках 3.6-3.10.

Ticket office simulation

2D

3D



This sample model represents possible passenger flows in entrance hall of the simulated subway station.

Multiple passengers go through the ticket control to or from the subway. When going to subway part they buy tickets at manual ticket offices or automatic ticket selling machines.

The subway station hall is equipped with  
- automated ticket selling machines  
- ticket offices  
- automated ticket controls (pay-passes)

Passengers choose the way to their targets in "free" space, without strict guidelines, walking around obstacles.

Simulation time: 39.85 sec.

Total number of passengers: 55

Default View

Top View

Center View

Intercity Exit

Speed up

Рисунок 3.6 – Симуляція в режимі за замовчуванням

### Ticket office simulation

2D 3D



This sample model represents possible passenger flows in entrance hall of the simulated subway station.

Multiple passengers go through the ticket control to or from the subway. When going to subway part they buy tickets at manual ticket offices or automatic ticket selling machines.

The subway station hall is equipped with  
- automated ticket selling machines  
- ticket offices  
- automated ticket controls (pay-passes)

Passengers choose the way to their targets in "free" space, without strict guidelines, walking around obstacles.

Simulation time: 52.632 sec.

Total number of passengers: 65

Default View

Top View

Center View

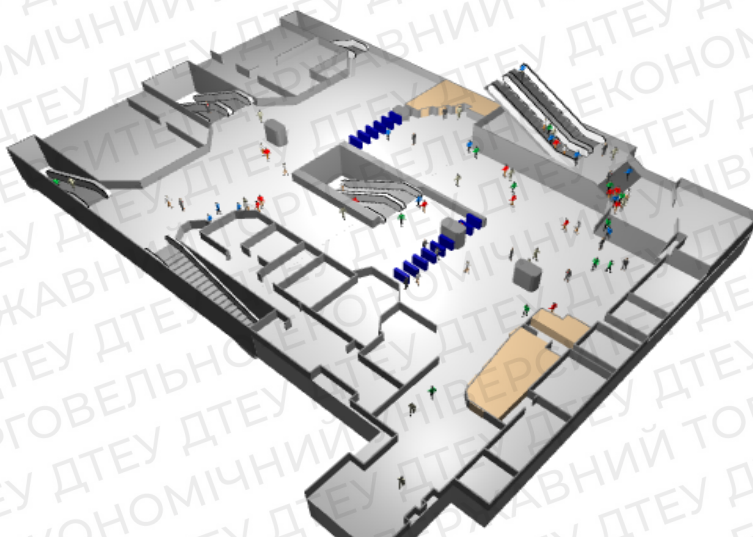
Intercity Exit

Speed up

Рисунок 3.7 – Симуляція у вигляді зверху

### Ticket office simulation

2D 3D



This sample model represents possible passenger flows in entrance hall of the simulated subway station.

Multiple passengers go through the ticket control to or from the subway. When going to subway part they buy tickets at manual ticket offices or automatic ticket selling machines.

The subway station hall is equipped with  
- automated ticket selling machines  
- ticket offices  
- automated ticket controls (pay-passes)

Passengers choose the way to their targets in "free" space, without strict guidelines, walking around obstacles.

Simulation time: 96.85 sec.

Total number of passengers: 105

Default View

Top View

Center View

Intercity Exit

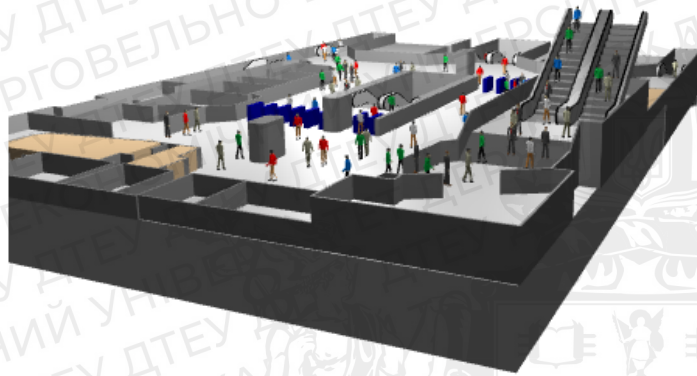
Speed up

Рисунок 3.8 – Симуляція в центрованому режимі

## Ticket office simulation

2D

3D



This sample model represents possible passenger flows in entrance hall of the simulated subway station.

Multiple passengers go through the ticket control to or from the subway. When going to subway part they buy tickets at manual ticket offices or automatic ticket selling machines.

The subway station hall is equipped with

- automated ticket selling machines
- ticket offices
- automated ticket controls (pay-passes)

Passengers choose the way to their targets in "free" space, without strict guidelines, walking around obstacles.

Simulation time: 131.7 sec.

Total number of passengers: 127

Default View

Top View

Center View

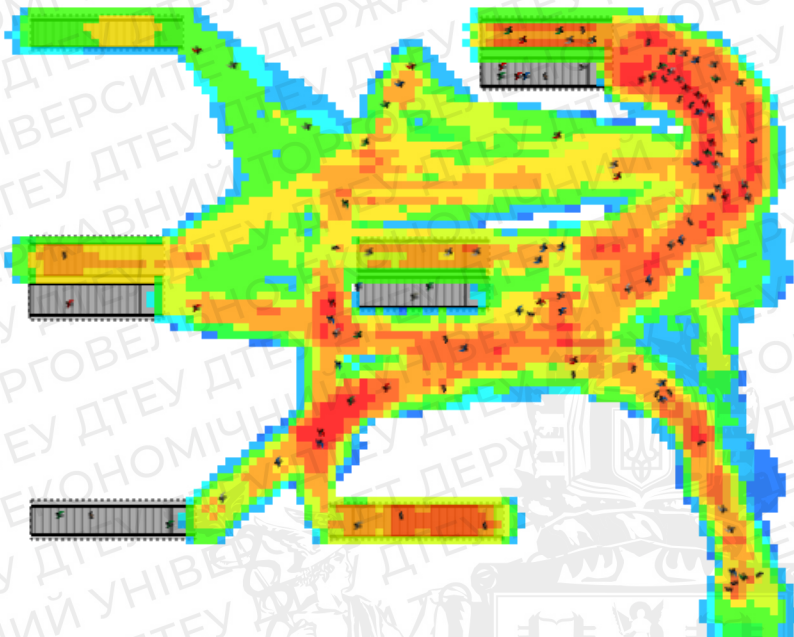
Intercity Exit

Speed up

Рисунок 3.9 – Симуляція в режимі виходу з каси

## Ticket office simulation

2D 3D



This sample model represents possible passenger flows in entrance hall of the simulated subway station.

Multiple passengers go through the ticket control to or from the subway. When going to subway part they buy tickets at manual ticket offices or automatic ticket selling machines.

The subway station hall is equipped with  
- automated ticket selling machines  
- ticket offices  
- automated ticket controls (pay-passes)

Passengers choose the way to their targets in "free" space, without strict guidelines, walking around obstacles.

Show density map

Simulation time: 388.5 sec.

Total number of passengers: 146

Speed up

Рисунок 3.10 – Симуляція з використанням карти щільності

Проведене тестування експерименту підтвердило повну працездатність та коректність розробленої імітаційної моделі.

## ВИСНОВКИ

У першому розділі ВКР розглянуто предметну область імітаційного моделювання, детально досліджено стан галузі на сьогоднішній день, її особливості, переваги та недоліки прикладного застосування, розглянуто найбільш поширені в інформаційних технологіях підходи до імітаційного моделювання.

У другому розділі ВКР було розглянуто специфіку роботи та проблеми сучасних квиткових кас, розроблено імітаційну модель та діаграми взаємодії для проектування зручної віртуальної каси.

У третьому розділі було здійснено детальний аналіз специфіки підходів до імітаційного моделювання, покроково описано розробку симуляції квиткової каси в середовищі Anylogic, здійснено тестування та доведено коректність розробленої імітаційної моделі.

Всі завдання ВКР виконані, мету ВКР повністю досягнуто.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аксельрод, Р. (1997). *Складність співпраці: Агентні моделі конкуренції та співпраці*. Принстон, Нью-Джерсі: Princeton University Press.
2. Брешіані С., Чампі Ф., Мелі Ф. та Ферраріс А. (2021). Використання великих даних для процесів спільної інновації: картографування сфери інновацій, керованих даними, пропозиція теоретичних розробок і надання програми досліджень. *Міжнародний журнал управління інформацією*, 60, стаття 102347. doi:10.1016/j.ijinfomgt.2021.102347
3. Кресвелл Дж. В. та Кресвелл Дж. Д. (2018). *Дизайн дослідження: підходи якісних, кількісних і змішаних методів (5-е вид.)*. Лос-Анджелес, Каліфорнія: SAGE.
4. Esser, F., & Vliegenthart, R. (2017). Порівняльні методи дослідження. У *Міжнародній енциклопедії комунікаційних методів дослідження* (с. 1-22). Гобокен, штат Нью-Джерсі: Wiley.
5. Gnanapragasam, S.N., Hodson, A., Smith, L.E., Greenberg, N., Rubin, G.J., & Wessely, S. (2021). Тягар дослідження COVID-19 для медичних працівників: огляд літератури та аудит. *Громадське здоров'я, Інтернет-видання Advance*. doi:10.1016/j.puhe.2021.05.006
6. Гуан, Д., Ван, Д., Халлегат, С., Девіс, С. Дж., Хуо, Дж., Лі, С., ... Гонг, П. (2020). Вплив заходів контролю COVID-19 на глобальний ланцюг поставок. *Nature Human Behavior*, 4(6), 577-587. doi:10.1038/s41562-020-0896-8
7. Хантрейс, Л. (2008). *Міжнародні порівняльні дослідження: Теорія, методи та практика*. Лондон, Великобританія: Міжнародна вища освіта Macmillan.
8. Гаррісон Дж. Р., Лін З., Керролл Г. Р. та Карлі К. М. (2007). Імітаційне моделювання в організаційних та управлінських дослідженнях. *Academy of Management Review*, 32(4), 1229-1245. doi:10.5465/amr.2007.26586485
9. Гук, Д. В., Портер, С. Дж., Герцог, К. (2018). Розміри: Побудова контексту для пошуку та оцінки. *Frontiers in Research Metrics and Analytics*, 3, 1-11. doi:10.3389/frma.2018.00023

10. Jiang, Y., & Wen, J. (2020). Вплив COVID-19 на готельний маркетинг і управління: перспективна стаття. Міжнародний журнал сучасного готельного менеджменту, 32(8), 2563-2573. doi:10.1108/IJCHM-03-2020-0237
11. Джоббер, Д., Ланкастер, Г. (2017). Продаж і управління збутом (8-е вид.). Лондон, Великобританія: Pearson Education, Inc.
12. Левінталь, Д. А., Маренго, Л. (2016). Імітаційне моделювання та дослідження бізнес-стратегії. У М. Augier & D. J. Teece (Eds.), *The palgrave encyclopedia of стратегічний менеджмент* (стор. 1-5). Лондон, Великобританія: Palgrave Macmillan.
13. Майна, Дж., і Мвангангі, П. (2020). Критичний огляд додатків моделювання в управлінні ланцюгом поставок. *Journal of Logistics Management*, 2020(1), 1-6. doi:10.5923/j.logistics.20200901.01
14. Міллс, М., ван де Бант, Г. Г., і де Брейн, Дж. (2006). Порівняльні дослідження. *Міжнародна соціологія*, 21(5), 619-631. doi:10.1177/0268580906067833
15. Otto, C., Willner, S.N., Wenz, L., Frieler, K., & Levermann, A. (2017). Моделювання розповсюдження втрат у глобальній мережі постачання: динамічна агентна модель акліматизації. *Журнал економічної динаміки та контролю*, 83, 232-269. doi:10.1016/j.jedc.2017.08.001
16. Сінгх С., Кумар Р., Панчал Р., Манодж і Тіварі М. К. (2021). Вплив COVID-19 на логістичні системи та збої в ланцюгу постачання продуктів харчування. *Міжнародний журнал досліджень виробництва*, 59 (7), 1993-2008. doi:10.1080/00207543.2020.1792000
17. Сінха, Д., Багоді, В., і Дей, Д. (2020). Структура порушення ланцюга постачання після COVID-19: модель системної динаміки. *Огляд зовнішньої торгівлі*, 55 (4), 511-534. doi:10.1177/0015732520947904
18. Стерман, Дж. Д. (2000). Системна динаміка: системне мислення та моделювання для складного світу. Кембридж, штат Массачусетс: Массачусетський технологічний інститут.
19. Тьеррі К., Бел Г. та Томас А. (2010). Роль моделювання та симуляції в управлінні ланцюгами поставок. *Журнал SCS M&S*, 1(2010), 1-8.



20. Васудеван, К., і Девікар, А. (2011). Вибір рівнів абстракції моделювання в імітаційних моделях складних виробничих систем. Матеріали 2011 Winter Simulation Conference (WSC), 66, 2268-2277. doi:10.1109/WSC.2011.6147938

