

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
(повна назва)


Кафедра Медіасистеми та технології
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Дослідження проблеми автоматизації процесу створення тривимірних
моделей приміщень
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання
групи ТЕМВм-24-1


 Руслана ЛІХІНІНА
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

Освітня програма

Технології електронних мультимедійних видань

Керівник  проф. Володимир ТКАЧЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри МСТ

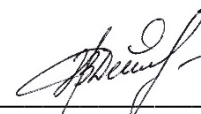
 Жанна ДЕЙНЕКО
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
Кафедра Медіасистеми та технології
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Технології електронних мультимедійних видань
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри МСТ



(підпис)

« 03 » листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Ліхніній Руслані Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження проблеми автоматизації процесу створення тривимірних
моделей приміщень

затверджена наказом по університету від 03 листопада 2025 р. № 989 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 21 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Тип спеціалізованого приміщення: операційний блок; Зображення варіантів інтер'єру
приміщень, типових меблів та обладнання; Державні стандарти та нормативна
документація до спеціалізованих приміщень закладів охорони здоров'я; Unity.

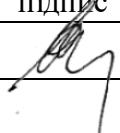
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ; Постановка задачі дослідження; Розробка методики вирішення проблеми;
Експериментальна частина дослідження; Економічна частина; Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Постановка задачі дослідження; Огляд літератури; Формалізація нормативних вимог для
медицини приміщень; Постановка задачі дослідження; Формулювання гіпотези
дослідження; Методика генерації приміщень; Послідовність розміщення обладнання на
основі системи обмежень; Механізм контрольованого впровадження порушень; Мета та
завдання експериментального дослідження; Основні етапи експериментального
дослідження; Хід експерименту; Формалізація нормативних вимог; Програмна реалізація
методики; Результати експерименту; Порівняльний аналіз альтернатив; Розрахунок
комплексних оцінок та інтерпретація результатів; Економічна частина; Висновки.

6. Консультанти розділів роботи


| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|----------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| | | підпис | дата |
| Основна частина | проф. Ткаченко В.П. |  | 20.12.2025 |
| Економічна частина | доц. Потій О.О. | | 19.12.2025 |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1 | Постановка та аналіз проблеми дослідження, визначення цілей, задач, гіпотези | 10.11.2025 | виконано |
| 2 | Вивчення літератури | 18.11.2025 | виконано |
| 3 | Вибір та обґрунтування методу вирішення проблеми | 23.11.2025 | виконано |
| 4 | Розробка методики вирішення проблеми | 29.11.2025 | виконано |
| 5 | Реалізація методики | 07.12.2025 | виконано |
| 6 | Експериментальна частина | 14.12.2025 | виконано |
| 7 | Економічна частина | 19.12.2025 | виконано |
| 8 | Оформлення пояснювальної записки | 20.12.2025 | виконано |
| 9 | Оформлення графічної частини | 21.12.2025 | виконано |

Дата видачі завдання 03 листопада 2025 р.

Здобувач



(підпис)

Керівник роботи



(підпис)

проф. Володимир ТКАЧЕНКО
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 63 с., 8 табл., 6 рис., 17 джерел.

UNITY, ПРОЦЕДУРНА ГЕНЕРАЦІЯ, ТРИВИМІРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, НОРМАТИВНІ ВИМОГИ, МЕДИЧНІ ПРИМІЩЕННЯ.

Об'єкт дослідження – процес процедурної генерації варіативних віртуальних середовищ на основі параметричних правил.

Предмет дослідження – методи та алгоритми інтеграції формалізованих нормативних вимог у логіку алгоритму процедурної генерації архітектури приміщень, їх оздоблення, наповнення обладнанням та налаштування параметрів мікроклімату.

Мета роботи – розроблення та експериментальна перевірка методики автоматизованої процедурної генерації тривимірних сцен медичних приміщень спеціального призначення з урахуванням формалізованих гігієнічних нормативів в інтерактивному середовищі.

У роботі проведено аналіз існуючих методів тривимірного моделювання, параметричного проектування та процедурної генерації контенту. Розроблено методику комбінованої процедурної генерації, що поєднує алгоритми створення топології приміщень і методи розміщення об'єктів на основі обмежень. Виконано формалізацію чинних українських будівельних і санітарних нормативів для операційних блоків, перетворивши їх на структурований набір правил та обмежень. Створено програмний прототип у середовищі Unity. Проведено експериментальне порівняльне оцінювання з використанням методу експертних оцінок та вагових коефіцієнтів.

ABSTRACT

Explanatory note of the master's qualification work: 63 p., 8 tabl., 6 fig., 17 sources.

UNITY, PROCEDURAL GENERATION, THREE-DIMENSIONAL MODELING, REGULATORY REQUIREMENTS, MEDICAL FACILITIES.

Object of research – the process of procedural generation of variable virtual environments based on parametric rules.

Subject of research – methods and algorithms for integrating formalized regulatory requirements into the logic of procedural generation algorithms for room architecture, finishing, equipment placement, and microclimate parameter configuration.

Aim of the work – development and experimental verification of a methodology for automated procedural generation of three-dimensional scenes of special-purpose medical facilities considering formalized hygienic standards in an interactive environment.

The work analyzes existing methods of three-dimensional modeling, parametric design, and procedural content generation. A combined procedural generation methodology was developed, integrating algorithms for creating room topology and constraint-based object placement methods. Formalization of current Ukrainian building and sanitary standards for operating blocks was performed, transforming them into a structured set of rules and constraints. A software prototype was created in the Unity environment. Experimental comparative evaluation was conducted using expert assessment methods and weight coefficients.

ЗМІСТ

| | С. |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП..... | 8 |
| 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ | 11 |
| 1.1 Огляд літератури за темою дослідження | 11 |
| 1.1.1 Теоретичні основи процедурної генерації та параметричного моделювання | 11 |
| 1.1.2 Методи генерації на основі обмежень для архітектурних застосувань | 13 |
| 1.1.3 Ігрові рушії як платформа для інтерактивних симуляторів | 14 |
| 1.1.4 Формалізація нормативних вимог для медичних приміщень | 15 |
| 1.2 Постановка задачі дослідження..... | 16 |
| 1.3 Формулювання гіпотези дослідження..... | 19 |
| 2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ | 20 |
| 2.1 Методика генерації базової архітектури приміщень..... | 21 |
| 2.2 Послідовність розміщення обладнання, система обмежень | 24 |
| 2.3 Механізм контрольованого впровадження порушень..... | 28 |
| 2.4 Генерація параметрів середовища та освітлення..... | 30 |
| 2.5 Оцінювання згенерованих сцен системою..... | 31 |
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 32 |
| 3.1 Визначення мети та завдань експериментального дослідження | 32 |
| 3.2 Опис та основні етапи експериментального дослідження | 32 |
| 3.3 Хід експерименту | 33 |
| 3.3.1 Формалізація нормативних вимог | 33 |
| 3.3.2 Методика генерації приміщень..... | 37 |
| 3.3.3 Програмна реалізація методики..... | 41 |
| 3.4 Результати експерименту..... | 45 |
| 3.4.1 Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання | 47 |
| 3.4.2 Порівняльний аналіз альтернатив..... | 49 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4.3 Розрахунок комплексних оцінок та інтерпретація результатів..... | 50 |
| 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА | 52 |
| 4.1 Характеристика науково-дослідного рішення | 52 |
| 4.2 Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата | 52 |
| 4.3 Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР..... | 54 |
| 4.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи..... | 58 |
| ВИСНОВКИ | 60 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ | 62 |

ВСТУП

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується їх глибоким проникненням у вузькоспеціалізовані галузі, зокрема медицину, архітектурне проєктування та освітні процеси. Створення та облаштування приміщень зі спеціальними вимогами, таких як операційні блоки медичних закладів, є складним інженерним завданням, що суворо регламентується численними гігієнічними та будівельними нормативами. Традиційні методи проєктування, що базуються на статичних кресленнях або тривимірних моделях, створених вручну, характеризуються значною трудомісткістю, обмеженою гнучкістю та не дозволяють ефективно аналізувати альтернативні проєктні рішення чи створювати варіативні сценарії для інтерактивного навчання персоналу.

У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування технологій процедурної генерації тривимірного контенту. На відміну від традиційного статичного моделювання, підхід, що базується на алгоритмічній варіативності, дозволяє автоматично створювати множину унікальних, проте функціонально коректних конфігурацій середовища. Це відкриває значні можливості для оптимізації проєктних рішень, швидкого прототипування та розробки інтерактивних застосунків-тренажерів. Водночас існує науково-технічна проблема, пов'язана з недостатньою розробленістю методик, які б органічно поєднували алгоритми процедурної генерації тривимірних сцен із жорсткими формалізованими наборами правил, якими є гігієнічні та інші державні нормативи.

Метою даного дослідження є вдосконалення та розробка методики автоматизованої процедурної генерації тривимірних сцен приміщень спеціального призначення з урахуванням визначених гігієнічних та будівельних нормативів, а також формування методології оцінювання ефективності генерації та функціональної коректності створених моделей.

Об'єктом дослідження є процес розробки та впровадження інтерактивних тривимірних симуляторів для приміщень зі спеціальними вимогами.

Предметом дослідження виступають методи та алгоритми процедурної генерації варіативних тривимірних сцен, що включають топологію приміщень, розміщення об'єктів обладнання, параметри оздоблення та характеристики мікроклімату, інтегровані з формалізованими гігієнічними правилами та обмеженнями.

Для досягнення поставленої мети в ході виконання роботи необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз інформаційних джерел, що охоплюють предметну область застосування технологій процедурної генерації у проектуванні та симуляції спеціалізованих приміщень;
- проаналізувати та формалізувати чинні гігієнічні нормативи та вимоги до проектування операційних блоків, перетворивши їх у структурований набір алгоритмічних правил та обмежень;
- розробити методіку комбінованої генерації унікальних конфігурацій приміщень операційних блоків, що враховує взаєморозташування кімнат, їх наповнення обладнанням та параметри середовища;
- реалізувати розроблений алгоритм на базі ігрового рушія Unity у вигляді функціонального програмного прототипу симулятора;
- провести експериментальну перевірку працездатності прототипу з оцінюванням варіативності та функціональної коректності згенерованих сцен;
- виконати порівняльне оцінювання ефективності створеного алгоритму відносно традиційних методів тривимірного моделювання.

Наукова новизна дослідження полягає у систематизації та формалізації прикладних гігієнічних нормативів для завдань комп'ютерного моделювання, а також у вдосконаленні методіки процедурної генерації для створення складних, нормативно-регульованих віртуальних середовищ спеціального призначення.

Практична значущість кваліфікаційної роботи полягає у розробці програмного прототипу «Тривимірний симулятор спеціалізованих медичних приміщень», який може бути використаний як інструмент швидкого прототипування проєктних рішень, як інтерактивний тренажер для навчання медичного персоналу, а також у навчальному процесі для демонстрації розробки складних інтерактивних мультимедійних застосунків.

Для досягнення мети використано такі методи дослідження: аналіз та систематизація літературних джерел; формалізація нормативних вимог для їх алгоритмічної імплементації; методи алгоритмізації та проєктування програмних систем; програмне моделювання в середовищі ігрового рушія Unity; експериментальне дослідження з використанням методу експертних оцінок та вагових коефіцієнтів для перевірки сформульованої гіпотези.

Інформаційну базу дослідження становлять наукові публікації з питань процедурної генерації контенту, державні будівельні норми та санітарні правила України, навчальні посібники, довідкові матеріали та електронні ресурси мережі Інтернет.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд літератури за темою дослідження

Сучасний етап розвитку комп'ютерних технологій характеризується активною інтеграцією методів тривимірного моделювання у вузькоспеціалізовані галузі, що вимагають високої точності візуалізації та симуляції складних процесів [1]. Особливої актуальності це набуває у проєктуванні об'єктів зі спеціальними вимогами, таких як медичні заклади, де точність моделювання безпосередньо впливає на безпеку та ефективність майбутніх робочих процесів [2]. Традиційні підходи до тривимірного моделювання базуються на статичному, ручному створенні цифрових тривимірних моделей із використанням спеціалізованих програмних пакетів. Такі методи характеризуються високою трудомісткістю та обмеженою гнучкістю, що не дозволяє проводити швидкий ітеративний аналіз проєктних рішень чи створювати варіативні сценарії для інтерактивного навчання [3].

1.1.1 Теоретичні основи процедурної генерації та параметричного моделювання

Процедурна генерація як науковий напрямок бере свій початок з досліджень у галузі комп'ютерної графіки та розробки ігор. Фундаментальні праці в цій галузі систематизують методи процедурної генерації, визначаючи її як алгоритмічне створення контенту з обмеженою або непрямую участю користувача [4]. Дослідники виділяють кілька базових підходів: генерація на основі формальних граматик, пошукові алгоритми, методи машинного навчання та constraint-based підходи. Кожен з цих методів має свої переваги та обмеження залежно від специфіки задачі [5].

У контексті архітектурного моделювання особливої уваги заслуговують дослідження, що застосовують формальні граматики. Концепція *shape grammar* представляє формальну систему правил для процедурної генерації архітектурних структур, де складні об'єкти описуються компактним набором рекурсивних правил. Такий підхід демонструє, як можна генерувати нескінченну варіативність при збереженні стильової узгодженості та функціональної коректності. Практична реалізація цих ідей знайшла втілення у спеціалізованих програмних системах для урбаністичного моделювання, які використовують CGA-послідовності для процедурного створення цілих міських районів з фасадами, що відповідають заданому архітектурному стилю та зонуванню.

Тісно пов'язаною з процедурною генерацією є параметричне моделювання, яке розглядає процес проектування не як маніпуляцію фіксованою формою, а як визначення алгоритмічних відносин між її елементами. Дослідження в цій галузі показують, що параметричний підхід дозволяє створювати адаптивні системи, де зміна одного параметра автоматично перебудовує всю структуру згідно з визначеними правилами та обмеженнями [6]. Ця концепція знайшла найбільш зрілу імплементацію в технологіях Будівельного Інформаційного Моделювання, де проектувальник оперує не геометричними примітивами, а "розумними" об'єктами, що містять інформацію про свої властивості, зв'язки з іншими елементами та поведінку в різних контекстах.

Аналіз BIM-систем, таких як Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD та інших комерційних рішень, показує їхню ефективність для створення проєктної документації. Дослідження підтверджують, що використання BIM-технологій скорочує час проектування на 30-40%, зменшує кількість помилок на етапі будівництва на 50% та покращує координацію між різними інженерними системами [7]. Важливою особливістю BIM є можливість автоматичної перевірки на відповідність будівельним нормам через спеціалізовані модулі валідації, такі як Solibri Model Checker. Проте існують

суттєві обмеження BIM-систем у контексті завдань дослідження. По-перше, ці системи орієнтовані на створення проєктної документації для реального будівництва, а не на генерацію варіативних навчальних сценаріїв. По-друге, параметричність у BIM означає можливість швидкої зміни параметрів існуючого проєкту, але не автоматичну генерацію множини унікальних варіантів. По-третє, дослідження виявляють значні проблеми сумісності між BIM-форматами та ігровими рушіями, що створює бар'єр для використання BIM-моделей у інтерактивних симуляторах [8]. При імпорті моделей втрачається значна частина метаданих, а інтерактивні можливості BIM-моделей обмежені інструментами для професійних архітекторів та інженерів, а не середовищами для навчання чи симуляції з перспективи першої особи.

1.1.2 Методи генерації на основі обмежень для архітектурних застосувань

Методи генерації на основі обмежень розглядаються дослідниками як найбільш перспективні для створення функціонально коректних просторів. Оглядом дослідження аналізують застосування *constraint satisfaction problems* для процедурної генерації, відзначаючи, що такий підхід дозволяє не просто створювати випадковий контент, а шукати оптимальне рішення в просторі всіх можливих конфігурацій, що задовольняють заданий набір правил [9].

Дослідження в галузі автоматичної генерації планувань інтер'єрів демонструють практичну ефективність *constraint-based* підходів. Алгоритми, що враховують ергономічні обмеження (мінімальні відстані між об'єктами для проходу), функціональні залежності (орієнтація меблів відносно один одного) та вимоги до освітлення, здатні генерувати планування, які експерти-дизайнери оцінюють як функціонально прийнятні у високому відсотку випадків [10]. Подальші дослідження розширили цей підхід, розробивши системи для генерації не лише двовимірних планувань, але й повноцінних тривимірних інтер'єрів [11]. Важливим внеском цих робіт є інтеграція декількох рівнів обмежень: топологічні

(взаємне розташування кімнат), геометричні (розміри та форми об'єктів) та семантичні (функціональне призначення зон).

Існуючі дослідження в цій галузі переважно зосереджені на житлових або офісних просторах загального призначення. Генерація систем включає оптимізацію розміщення меблів відповідно до правил ергономіки, освітленості та шляхів переміщення. Однак специфіка медичних приміщень з їхніми жорсткими вимогами чистоти залишається поза увагою дослідників. Крім того, більшість академічних прототипів не доведені до рівня повноцінних програмних застосунків з інтерактивними можливостями, що обмежує їхнє практичне застосування в навчальних цілях.

1.1.3 Ігрові рушії як платформа для інтерактивних симуляторів

Сучасні ігрові рушії надають потужний інструментарій для створення інтерактивних тривимірних середовищ реального часу. Дослідження тенденцій використання ігрових рушіїв для архітектурної візуалізації показують, що платформи Unity та Unreal Engine здатні забезпечити фотореалістичну візуалізацію в реальному часі, при цьому Unity демонструє кращу гнучкість для розробки кастомної логіки завдяки відкритій архітектурі та підтримці програмування мовою C# [8]. Ці рушії підтримують складні системи освітлення (глобальне освітлення, трасування променів), фізичні симуляції, роботу зі звуком та анімацією, що робить їх придатними не лише для розваг, але й для навчальних застосунків.

В медичній освіті ігрові рушії активно використовуються для створення симуляторів хірургічних процедур. Оглядові дослідження систематизують численні публікації про використання віртуальної реальності для навчання медичного персоналу, демонструючи, що VR-тренажери підвищують ефективність навчання хірургічних навичок на 23-35% порівняно з традиційними методами [1]. Лонгітюдні дослідження виявляють, що інтерактивні симулятори операційних процедур покращують швидкість

прийняття рішень у стресових ситуаціях, причому ключовим фактором є саме варіативність сценаріїв [12]. Студенти, які тренувались на множині різних конфігурацій, демонстрували значно кращі результати, ніж ті, хто працював з одним статичним середовищем.

Проте аналіз існуючих медичних симуляторів виявляє суттєвий недолік: переважна більшість з них фокусується виключно на відтворенні хірургічних процедур, роботі з інструментами та анатомії пацієнта, використовуючи операційне середовище лише як статичний фон, створений художниками вручну [13]. Дослідники наголошують на необхідності розробки симуляторів, що дозволяють вивчати саме організацію та облаштування медичних приміщень, оскільки порушення гігієнічних норм є значним фактором ризику інфекцій. Існують також навчальні застосунки віртуальної реальності, що дозволяють віртуально оглянути лікарню або операційний блок, але ці середовища є фіксованими, створеними для конкретного закладу, не генеруються автоматично і не призначені для вивчення різноманітних конфігурацій чи виявлення порушень нормативів.

1.1.4 Формалізація нормативних вимог для медичних приміщень

Проектування медичних приміщень спеціального призначення, зокрема операційних блоків, є складним інженерним завданням, що регламентується численними нормативними документами. Дослідження в галузі архітектури медичних закладів аналізують еволюцію вимог до операційних блоків, виявляючи тенденцію до все більшої деталізації та міждисциплінарності нормативів, що ускладнює їх ручне врахування при проектуванні [2].

Українські нормативи представлені Державними будівельними нормами для закладів охорони здоров'я та Державними санітарними нормами і правилами [14, 15]. Аналіз цих документів показує, що вони містять понад 150 окремих вимог до операційних блоків, що охоплюють мінімально допустимі площі, висоти приміщень, глибину залів, вимоги до топології та

функціонального зонування, параметри вентиляції та мікроклімату. Визначені й вимоги до оздоблювальних матеріалів: наприклад, поверхні стін, підлоги та стелі мають бути гладкими, безшовними, стійкими до агресивних дезінфікуючих засобів. Підлога ж має мати закруглений перехід до стін (галтель) висотою мінімум 150 мм для запобігання скупченню пилу та полегшення вологого прибирання.

Міжнародні стандарти [16, 17] також застосовуються до медичних закладів України та визначають класифікацію чистоти повітря за концентрацією частинок. Для операційних з ламінарним потоком вимагається клас ISO 5, для передопераційних – ISO 7. Це накладає суворі вимоги на системи вентиляції, зокрема кратність повітрообміну, підтримувану температуру та відносну вологість. Стандарти освітлення визначають, що освітленість на рівні операційного столу має становити 1000-1500 лк, колірна температура світла має бути близькою до денного світла (4000-4500 К) для точної кольоропередачі тканин під час проведення операцій.

Наявна наукова література не пропонує систематичних методик формалізації цих нормативів для автоматизованих систем проектування. Окремою проблемою є перетворення текстових вимог у структуровані алгоритмічні правила та обмеження, придатні для обробки програмними системами. Відсутні також методики автоматичної валідації згенерованих просторів на відповідність специфічним нормативам медичних приміщень.

1.2 Постановка задачі дослідження

Проведений аналіз літератури та існуючих програмних рішень дозволяє виявити значний розрив між наявними технологіями та потребами предметної області. З одного боку, існують потужні системи параметричного моделювання та BIM, які дозволяють створювати нормативно коректні, але статичні моделі, непридатні для швидкої генерації множини варіантів чи повноцінної інтерактивної симуляції. З іншого боку, є технології процедурної генерації та

інтерактивної візуалізації на базі ігрових рушіїв, але вони не інтегровані зі специфічними медичними нормативами та не містять вбудованих механізмів перевірки відповідності складним гігієнічним вимогам.

Відсутні дослідження, що поєднують процедурну генерацію зі специфічними медичними нормативами. Існуючі роботи з процедурної генерації зосереджені на житлових, офісних або громадських просторах загального призначення. Специфіка операційних блоків з такими гігієнічними вимогами, класами чистоти повітря, особливими вимогами до поверхонь та обладнання залишається поза увагою дослідників. Більше того, не розроблені методики контрольованого впровадження порушень для навчальних цілей. Усі проаналізовані системи спрямовані виключно на генерацію коректних конфігурацій, тоді як завдання створення середовищ з визначеними, контрольованими помилками для тренування навичок їх виявлення не розглядається в літературі.

Не вирішеною залишається проблема ефективної інтеграції між системами, що забезпечують нормативну коректність, та платформами, що надають інтерактивність. Існуючі дослідження лише констатують технічні проблеми такої інтеграції, але не пропонують альтернативних архітектурних рішень. Відсутні також методики комплексного оцінювання якості процедурно згенерованих медичних приміщень – не розроблені критерії та метрики для валідації як функціональної коректності, так і навчальної ефективності таких систем.

Таким чином, відсутні рішення, що одночасно забезпечували б автоматичну процедурну генерацію множини унікальних конфігурацій, жорстке дотримання формалізованих гігієнічних та будівельних нормативів, специфічних для медичних приміщень, можливість контрольованого впровадження порушень для навчальних та тренувальних цілей та інтерактивність з можливістю дослідження середовища від першої особи. Саме на це спрямоване дане дослідження, що обґрунтовує його наукову новизну та практичну значущість.

Актуальність даної роботи полягає в тому, що на тлі зростаючої складності медичних технологій та посилення вимог до безпеки, існує гостра потреба в інструментах швидкого та надійного прототипування проєктних рішень. Автоматизація процесу генерації таких унікальних приміщень дозволить не лише значно прискорити та здешевити етап проєктування, але й, що більш важливо, усунути ризик людської помилки шляхом імплементації нормативів безпосередньо в логіку генеративного алгоритму. Дане дослідження зосереджується саме на розробці та перевірці такої автоматизованої методики.

Метою даного дослідження є розробка та експериментальна перевірка методики (алгоритму) автоматизованої процедурної генерації тривимірних сцен медичних приміщень спеціального призначення (операційна, передопераційна, склад стерильних матеріалів) з урахуванням формалізованих гігієнічних нормативів в інтерактивному середовищі.

Об'єктом дослідження є процес процедурної генерації варіативних віртуальних середовищ на основі параметричних правил.

Предметом дослідження є методи та алгоритми інтеграції формалізованих нормативних вимог у логіку алгоритму процедурної генерації архітектури (взаєморозташування) приміщень, їх оздоблення, наповнення обладнанням та налаштування параметрів мікроклімату.

Таким чином, поставлена в роботі мета обумовила необхідність вирішення наступних задач:

- провести поглиблений аналіз та формалізацію чинних українських будівельних і санітарних нормативів, що стосуються проєктування операційних, передопераційних та стерильних складів, перетворивши їх на чіткий набір алгоритмічних правил та обмежень;

- розробити методику комбінованої процедурної генерації, що поєднує алгоритми створення топології приміщень та методи розміщення об'єктів на основі обмежень;

- програмно реалізувати розроблену методику у вигляді прототипу в середовищі ігрового рушія Unity;
- обґрунтувати та розробити методологію експериментальної перевірки працездатності прототипу, що включатиме критерії оцінки функціональної коректності (відповідності нормам), варіативності та ефективності генерації;
- провести аналіз результатів експерименту та сформулювати висновки щодо ефективності та доцільності запропонованого підходу.

1.3 Формулювання гіпотези дослідження

Спираючись на проведений аналіз існуючих технологічних обмежень, сформульовано наукову гіпотезу дослідження: застосування комбінованого алгоритму, що поєднує параметричне моделювання та процедурну генерацію на основі обмежень, є більш ефективним методом створення проєктних рішень для приміщень спеціального призначення.

Припускається, що запропонований підхід дозволить автоматично генерувати умовно необмежену кількість коректних (щодо дотримання формалізованих нормативів) та унікальних тривимірних сцен. Очікується, що час, витрачений на автоматичну генерацію, буде значно меншим за час, необхідний для ручної розробки одного аналогічного варіанту. Проведення експериментальної перевірки цієї гіпотези дозволить підтвердити практичну цінність розробленої методики та обґрунтувати її використання як інструменту для прототипування, перевірки проєктів та створення інтерактивних навчальних симуляторів.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ

На основі проведеного аналізу існуючих підходів було розроблено комплексну методику автоматизованої генерації тривимірних сцен приміщень спеціального призначення. Ця методика поєднує принципи процедурної генерації, підходи до розміщення об'єктів на основі обмежень та формалізовані нормативні вимоги в єдину систему.

Розроблена методика базується на багаторівневій архітектурі, де кожен рівень відповідає за певний аспект створення віртуального середовища. Концептуально систему можна представити як послідовність перетворень від абстрактних параметрів до конкретної тривимірної сцени.

На першому рівні зберігається повна база формалізованих нормативних вимог у структурованому вигляді. Для кожного типу приміщення визначено набір так названих жорстких та м'яких обмежень. Жорсткі обмеження представляють вимоги, порушення яких є категорично неприпустимим. Наприклад, мінімальна площа операційної не може бути менше встановлених нормативами 30 м². М'які обмеження формують рекомендації, відхилення від яких небажані, проте допустимі за законом в певних межах.

Другий рівень системи представляє об'єктну модель середовища. Кожен елемент майбутньої сцени описується як окрема сутність з визначеним набором атрибутів. До цих атрибутів належать допустимі варіанти тривимірних моделей, можливі матеріали для текстурування, правила просторового розміщення та параметри інтерактивної взаємодії. Окремо для кожного об'єкта зберігається інформація про типи порушень, які можна через нього реалізувати для навчальних цілей.

Третій рівень забезпечує безпосередньо процес генерації та компоновки елементів. Тут функціонують процедури, що на основі даних з попередніх рівнів створюють конкретну конфігурацію сцени. Процес генерації

реалізовано як керований випадковий процес, де кожне рішення приймається псевдовипадково, але строго в межах визначених обмежень.

Четвертий рівень відповідає за реалізацію та візуалізацію. Саме тут абстрактна конфігурація перетворюється на конкретні тривимірні об'єкти в середовищі ігрового рушія. На цьому етапі налаштовуються системи освітлення, застосовуються матеріали, визначаються фізичні властивості об'єктів для коректної взаємодії, а отже і вся сцена.

2.1 Методика генерації базової архітектури приміщень

Генерація тривимірної сцени операційного блоку розпочинається зі створення базової архітектурної структури як фундаменту всього віртуального середовища поточної ітерації. Цей процес організовано як послідовність логічно пов'язаних етапів, кожен із яких вирішує конкретну підзадачу формування просторового каркасу з урахуванням нормативних обмежень і забезпеченням варіативності результату.

Першим етапом система визначає топологію та геометричні параметри кожного приміщення в складі операційного блоку. Для операційної зали алгоритм випадковим чином встановлює розміри в нормативно дозволених межах (від мінімальних 30 м² до максимальних 50 м² загальної площі). Співвідношення сторін приміщення обмежується діапазоном від 1:1 до 1:1,5 для забезпечення раціональної геометрії простору, що відповідає як функціональним, так і ергономічним вимогам. Глибина операційної зали має обов'язково перевищувати 5 м згідно з будівельними нормами, тоді як висота від підлоги до стелі визначається в діапазоні від 2,8 м до 3,2 м. Для суміжних приміщень встановлюються наступні параметри: передопераційна визначає свою площу в межах від 10 м² до 15 м², стерильний склад обмежується діапазоном від 8 м² до 12 м². Система автоматично обчислює взаємне просторове розташування всіх кімнат, забезпечуючи правильну топологічну структуру операційного блоку, де створюється шлюзову зону, що запобігає

прямому контакту стерильного простору з менш чистими зонами, а стерильний склад також має прямий доступ до операційної для мінімізації шляху транспортування інструментів і матеріалів.

Наступним етапом генерації є створення (вибір) покриття підлоги, яке знову ж таки має особливе значення з погляду гігієнічних вимог до операційних приміщень. Відповідно до санітарних норм підлога в стерильних зонах має мати спеціальний закруглений перехід до стін (галтель). Цей конструктивний елемент виконує важливу функцію запобігання скупченню пилу та мікроорганізмів у кутах приміщення, а також значно полегшує процес вологого прибирання та дезінфекції поверхонь. Алгоритм генерації підлоги працює в два послідовні кроки: спочатку формується основна горизонтальна площа відповідно до попередньо обчислених розмірів приміщення, після чого вздовж усього периметру додається галтельний елемент із заданими геометричними параметрами. Для забезпечення візуальної різноманітності згенерованих сцен система оперує різними варіантами коректних текстур підлоги, а також радіусом закруглення галтелі, профілем переходу та геометрією можливих технологічних з'єднань покриття. Паралельно в базі даних системи зберігаються помилкові варіанти моделей, що не мають галтелі взагалі або демонструють порушення цілісності покриття, які можуть використовуватися для створення навчальних сценаріїв із контрольованими порушеннями нормативів.

Вибір матеріалу для покриття підлоги здійснюється алгоритмом випадковим чином із попередньо сформованого набору допустимих варіантів, кожен із яких класифіковано як коректний або помилковий відносно гігієнічних вимог. До коректних варіантів належать текстури, що імітують гладкі безшовні покриття з високою хімічною стійкістю до агресивних дезінфікувальних засобів. Серед них представлені, наприклад, полімерні наливні підлоги світлих нейтральних тонів, керамогранітні плити великого формату з мінімальною шириною швів, комерційний лінолеум спеціального медичного призначення з антистатичними та антибактеріальними

властивостями. Помилкові варіанти матеріалів включають текстури з пористою або шорсткою структурою поверхні, покриття з видимими широкими швами між елементами, матеріали з неоднорідністю кольору або фактури, що створює складнощі для якісного очищення та суперечить санітарним вимогам до операційних приміщень.

Після завершення генерації підлоги система переходить до створення стін як вертикальних обмежуючих площин заданої висоти між точками, що визначають периметр кожного приміщення. Товщина внутрішніх перегородок встановлюється відповідно до будівельних норм і зазвичай становить від 200 мм до 250 мм залежно від конструктивних особливостей та вимог звукоізоляції. Особливу увагу в алгоритмі приділено формуванню кутових з'єднань стін, оскільки в медичних приміщеннях рекомендується уникати утворення різких прямих внутрішніх кутів, де можуть накопичуватися забруднення та ускладнюється процес дезінфекції. Тому система здатна генерувати кути з невеликим радіусом закруглення від 20 мм до 30 мм або формувати скошену фаску, що створює більш гігієнічне з'єднання поверхонь.

Віконні прорізи в зовнішніх стінах створюються алгоритмом із певною ймовірністю залежно від приміщення, що становить від 30 % до 50 % для кожної потенційної зовнішньої стіни, оскільки наявність природного освітлення в операційних залах є бажаною для персоналу, проте не становить обов'язкової вимоги функціонування. Коли система приймає рішення про генерацію віконного прорізу, його геометричні параметри та розташування визначаються нормативами природного освітлення приміщень. Підвіконник розміщується на висоті щонайменше 1,2 м від рівня підлоги для забезпечення можливості розміщення обладнання вздовж стін, а загальна площа віконного прорізу має становити від однієї шостої до однієї восьмої площі підлоги приміщення для забезпечення достатнього рівня природної освітленості робочих зон відповідно до санітарних норм.

Вибір оздоблювальних матеріалів для стін відбувається за принципом, аналогічним до вибору покриття підлоги, з використанням бази даних

коректних і помилкових варіантів. Коректні варіанти представлені текстурами гладких фарбованих поверхонь світлих нейтральних тонів, серед яких білий, світло-блакитний і світло-зелений кольори є найпоширенішими в медичній практиці. Також до допустимих належать керамічні плитки з глазурованою гладкою поверхнею, що легко піддається вологому очищенню, і панелі зі спеціалізованого медичного пластику з антибактеріальним покриттям. Помилкові варіації включають текстуровані та рельєфні покриття, матеріали з видимими стиками між панелями, пористі та негладкі поверхні, що не відповідають гігієнічним вимогам до приміщень операційних блоків.

Завершальним архітектурним елементом базової структури приміщення є генерація стелі, яка в операційних блоках також підлягає специфічним вимогам щодо можливості легкого очищення, відсутності відкритих конструкцій для накопичення пилу та здатності витримувати кріплення важкого медичного обладнання. Найчастіше в сучасній практиці застосовуються підвісні стелі з гладких панелей або суцільні натяжні конструкції світлих тонів. Алгоритм генерує стельову площину на заданій висоті з прив'язкою до неї інших пов'язаних елементів. Особливе значення в структурі стелі операційної має дифузор ламінарного потоку повітря, що являє собою спеціальний стельовий модуль. Його система забезпечує однонаправлений вертикальний потік багаторазово відфільтрованого повітря безпосередньо над операційним столом, створюючи локальну зону максимальної стерильності у найбільш важливій робочій області хірургів, що є ключовою вимогою для сучасних операційних залів.

2.2 Послідовність розміщення обладнання, система обмежень

Після створення базової архітектурної оболонки приміщень система переходить до найскладнішого етапу генерації, що полягає в наповненні просторів функціональними об'єктами медичного обладнання та елементами інтер'єру. Цей етап являє собою вирішення багатовимірної задачі оптимізації

розміщення з множинними взаємопов'язаними обмеженнями, що мають різну пріоритетність. Складність цієї задачі полягає в необхідності одночасного врахування геометричних обмежень на неперетин об'єктів, функціональних обмежень на їхнє взаємне розташування, ергономічних вимог до доступності обладнання та необхідності збереження вільних зон для переміщення персоналу.

Центральним принципом розробленого алгоритму є система пріоритетів розміщення об'єктів, що забезпечує коректність результату навіть у складних просторових конфігураціях. Згідно неї, об'єкти розміщуються не в довільному або випадковому порядку, а відповідно до суворої ієрархії, де кожен рівень має чітко визначене функціональне призначення. Такий підхід гарантує, що критично важливі елементи будуть розміщені в першу чергу, тоді як менш важливі об'єкти підлаштовуються під уже створену конфігурацію та заповнюють доступний простір, що лишився.

Найвищий пріоритет у системі мають елементи, що забезпечують топологічну зв'язність простору та визначають можливість функціонування всього операційного блоку. До цієї категорії належать дверні блоки, що з'єднують приміщення між собою, двері для входу пацієнтів і персоналу, а також шлюзові двері між зонами різного класу чистоти повітря. Розміщення цих елементів має бути виконано з урахуванням вимог до потоків руху.

Другий рівень пріоритету займає основне медичне обладнання, розташування якого визначає функціональне зонування операційної та формує її робочу конфігурацію. Центральним елементом цього рівня є операційний стіл, що має розміщуватися коло геометричного центра операційної зали з допустимим відхиленням до 20 % для забезпечення рівномірного доступу з усіх боків. Безтіньові хірургічні лампи мають розташовуватися безпосередньо над операційним столом з мінімальним відхиленням горизонтальних координат, що забезпечує оптимальне освітлення операційного поля. Анестезіологічна стійка розміщується біля голови операційного столу на відстані від 300 мм до 500 мм, що відповідає ергономічним вимогам для роботи анестезіолога. Столи для хірургічних інструментів позиціонуються

збоку від операційного столу на відстані не більше 1500 мм, що відповідає зоні комфортної досяжності для хірурга без необхідності робити крок і відволікатися від операційного поля.

Третій рівень пріоритету включає допоміжне медичне обладнання, що забезпечує підтримку життєвих функцій пацієнта та моніторинг його стану. До цієї категорії входять апарати штучної вентиляції легень, системи моніторингу життєво важливих показників пацієнта, електрохірургічні апарати, шафи та стелажі для зберігання стерильних матеріалів і медикаментів. Для передопераційної обов'язковим елементом є спеціальна медична раковина для хірургічного миття рук, що має розташовуватися біля стіни з відповідним підведенням комунікацій.

Четвертий рівень представляють системи життєзабезпечення та контролю параметрів середовища. Вентиляційні решітки для видалення повітря нижньої зони розміщуються на стінах на висоті від 150 мм до 320 мм від підлоги відповідно до принципів організації повітряних потоків у чистих приміщеннях. Монітори індикації параметрів мікроклімату встановлюються на стінах на висоті від 1,5 м до 1,8 м для візуального контролю для персоналу.

П'ятий, найнижчий рівень пріоритету включає додаткові елементи інтер'єру, такі як настінні годинники, рентген-негатоскопи для перегляду знімків, контейнери для роздільного збирання медичних відходів.

Для кожного об'єкта в базі даних системи має бути визначено набір правил розміщення, формалізованих у вигляді обмежень різних типів, що описують допустимі та недопустимі варіанти його позиціонування в просторі. Просторові обмеження визначають, в яких зонах приміщення конкретний об'єкт має, може або категорично не може бути розміщений з урахуванням його функціонального призначення. Обмеження відносного розташування визначають геометричні та функціональні залежності між парами або групами об'єктів. Обмеження щодо недопустимості перетинів забезпечують фізичну коректність сцени, гарантуючи відсутність взаємного проникнення мешів моделей. Для кожного об'єкта визначено його об'єм з невеликим запасом, зазвичай від 50 мм до 100 мм, що

імітує реальний зазор між меблями та обладнанням у фізичному просторі. Обмеження доступності гарантують, що в приміщенні залишаються вільні проходи достатньої ширини для безпечного та комфортного переміщення персоналу. Визначено мінімальну ширину основних шляхів пересування 1200 мм і другорядних проходів 800 мм відповідно до будівельних норм. Навколо операційного столу має залишатися вільна зона шириною щонайменше 1000 мм по всьому периметру для забезпечення вільного переміщення та маневрування хірургічної бригади під час операції.

Розроблений алгоритм розміщення працює в ітеративному режимі, послідовно обробляючи кожен об'єкт відповідно до визначеного порядку пріоритетів. Для поточного об'єкта спочатку визначається множина потенційно допустимих позицій на основі аналізу його просторових обмежень і правил відносного розташування щодо вже розміщених об'єктів. З цієї множини випадковим чином обирається позиція-кандидат для проведення спроби його розміщення. Далі виконується перевірка на колізії шляхом аналізу перетинів обраних колайдерів (об'ємів) з усіма раніше розміщеними об'єктами. Якщо виявлено перетин хоча б з одним об'єктом, поточна позиція відхиляється і генерується нова позиція-кандидат з усієї доступної множини.

Якщо всі перевірки виконано успішно, об'єкт остаточно розміщується в обраній позиції, його просторові координати та орієнтація фіксуються для використання в подальших розрахунках розміщення наступних об'єктів. Якщо після певної кількості спроб, що зазвичай обмежується 50 ітераціями для одного об'єкта, знайти допустиму позицію не вдалося, об'єкт позначається як нерозміщений і система переходить до обробки наступного елемента в черзі. Після завершення спроб розміщення всіх об'єктів виконується фінальна перевірка повноти та коректності згенерованої конфігурації. Якщо об'єкти високого пріоритету, такі як операційний стіл або безтіньова лампа для операційної, не вдалося розмістити через просторові конфлікти, вся генерація вважається невдалою і процес автоматично перезапускається з новими випадковими параметрами розмірів приміщень і початковими умовами.

Для забезпечення візуальної варіативності згенерованих сцен кожен об'єкт у системі може бути представлений декількома альтернативними тривимірними моделями та наборами текстур. Наприклад, операційний стіл може мати три основні варіанти моделей: класичний механічний стіл з гідравлічним підйомником, електромеханічний стіл із пультом керування або універсальний модульний стіл зі змінними секціями. Кожна з цих моделей може комбінуватися з різними текстурами не тільки металевої основи, що включає різновиди сталі, алу й також із різними текстурами для робочої поверхні, включаючи різний колір. При генерації коректної сцени без порушень для кожного об'єкта алгоритм випадковим чином обирає одну з коректних моделей і одну з коректних текстур із доступного набору, що забезпечує унікальність кожної згенерованої конфігурації (набору об'єктів) навіть при ідентичних топологічних параметрах приміщень.

2.3 Механізм контрольованого впровадження порушень

Однією з ключових особливостей розробленої методики є можливість не тільки генерувати коректні сцени, а й створювати набори з визначеною кількістю конкретних порушень нормативів. Це є важливим для навчальних застосунків, де користувач має аналізувати приміщення та виявляти помилки в їх облаштуванні.

Усі можливі порушення класифіковано за типами. До основних категорій належать порушення в моделях об'єктів, коли використовується некоректна тривимірна модель, наприклад підлога без належного підйому. Порушення в матеріалах виникають при застосуванні текстур, що не відповідають гігієнічним вимогам, таких як пористі поверхні або покриття з видимими швами. Порушення розташування означають, що об'єкт розміщений в недозволеній зоні, наприклад вентиляційна решітка витяжного повітря занадто високо від підлоги. Порушення кількості виникають, коли екземплярів об'єкта недостатньо або надто багато відносно норм.

Окремими категоріями виділено порушення наявності обов'язкових елементів, коли найважливіший об'єкт відсутній у приміщенні, та присутність заборонених елементів, наприклад таких, як кисневий балон в операційній замість централізованої системи подачі. Також можливі порушення параметрів мікроклімату, коли температура, вологість або повітрообмін виходять за межі норми, та порушення освітлення з невідповідною колірною температурою або недостатньою інтенсивністю.

Перед початком генерації сцени визначається загальна кількість порушень, які має містити конфігурація. Це може бути фіксоване число або випадкове значення в певному діапазоні. Далі ці порушення розподіляються між етапами генерації та групами об'єктів. Кожна група має максимальний ліміт порушень, щоб уникнути концентрації всіх помилок в одному місці, що зробило б їх виявлення занадто очевидним.

Розподіл відбувається шляхом випадкового вибору етапу генерації та призначення йому одного порушення з перевіркою, чи не перевищено ліміт для цієї групи. Процес повторюється доки всі заплановані порушення не будуть розподілені між різними етапами та групами об'єктів.

При генерації кожного об'єкта система перевіряє, чи заплановано для нього порушення. Якщо так, випадковим чином обирається один тип порушення з доступних для даного об'єкта. Важливо, що порушується тільки один параметр, а інші залишаються коректними. Наприклад, підлога може мати правильну модель з підйомом, але некоректну текстуру. Це відповідає реальним ситуаціям, де помилка зазвичай локальна та стосується лише одного параметру об'єкта.

Інформація про кожне створене порушення фіксується в спеціальному реєстрі помилок. Для кожної помилки зберігається ідентифікатор об'єкта, тип порушення, параметр порушення та детальний опис для можливості надання зворотного зв'язку користувачу або проведення опитування можливостями сторонніх систем.

2.4 Генерація параметрів середовища та освітлення

Окрім фізичних об'єктів важливими елементами симульованого середовища є параметри мікроклімату та системи освітлення, що мають не менш важливе значення для праці в операційних приміщень.

Процес генерації параметрів мікроклімату починається з визначення, чи буде в даній сцені порушення цих параметрів відповідно до раніше здійсненого розподілу помилок. Якщо порушення не заплановано, всі параметри генеруються випадковим чином в межах нормативних діапазонів. Якщо ж заплановано порушення, випадковим чином обирається який саме параметр буде некоректним, після чого генерується значення поза допустимими межами. Найбільш зрозумілим прикладом є температура, значення якої може бути занадто низьким надмірно високим.

Згенеровані значення параметрів відображаються на віртуальних приладах контролю мікроклімату, що розміщені на стінах приміщень, та на плані блоку. Користувач може підійти до такого монітора і побачити поточні значення температури, вологості та повітрообміну, що дозволяє виявити можливі порушення нормативів.

Генерація освітлення включає кілька компонентів. Загальне освітлення приміщення реалізується через стельові світильники, кількість та розміщення яких було визначено на попередніх етапах. Кожному світильнику призначаються параметри інтенсивності, що розраховуються так, щоб забезпечити необхідну освітленість на різних рівнях приміщення.

Додатково налаштовується глобальне освітлення в середовищі Unity, що імітує розсіяне світло від всіх поверхонь. Генерується також так званий скайбокс для імітації різного часу доби та, відповідно, більшої варіабельності результатів

Якщо заплановано порушення в освітленні, система може згенерувати невірну колірну температуру світла, активувати ефект мерехтіння або знизити інтенсивність до недостатнього рівня.

2.5 Оцінювання згенерованих сцен системою

Завершальним компонентом розробленої методики є система оцінювання якості та коректності згенерованих конфігурацій.

Після завершення процесу генерації перед передачею сцени користувачеві виконується автоматична перевірка сцени за різними критеріями. Перевіряється повнота набору обладнання, тобто чи присутні всі обов'язкові об'єкти в сцені, якщо їх відсутність не є запланованим порушенням. Також контролюється, щоб фактична кількість створених порушень точно відповідала заданій. Якщо хоча б одна перевірка провалена, сцена відкидається і генерація перезапускається з новими параметрами.

Додатково фіксується кількісна метрика – час створення сцени. Вона буде застосована в експериментальній частині дослідження для перевірки висунутої гіпотези про переваги створюваного автоматизованого підходу.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Визначення мети та завдань експериментального дослідження

Зростаюча тенденція до застосування інтерактивних симуляцій та технологій віртуальної реальності у медичній освіті й архітектурному проєктуванні обумовлює необхідність зосередження уваги не лише на фотореалістичності візуалізації, але й на функціональній коректності модельованих середовищ та ефективності їх створення.

Основною гіпотезою даної роботи є припущення, що застосування підходу процедурної генерації згідно розробленої методики є більш ефективним методом створення тривимірних сцен приміщень спеціального призначення порівняно з традиційним ручним моделюванням. Метою експериментального дослідження є практична перевірка та підтвердження цієї гіпотези через розробку програмного прототипу та проведення його комплексного оцінювання за чітко визначеними критеріями для встановлення дієвості та переваг запропонованого підходу. Досягнення цієї мети вимагає розробки програмного прототипу та проведення його комплексного оцінювання за визначеними критеріями для встановлення його дієвості та переваг.

3.2 Опис та основні етапи експериментального дослідження

Експеримент побудовано на порівнянні двох підходів до створення тривимірних моделей операційних блоків. Перший підхід передбачає використання розробленого програмного прототипу для автоматичної генерації конфігурацій приміщень. Другий підхід базується на традиційному методі ручного моделювання та трансформації моделей з використанням спеціалізованого програмного забезпечення Blender.

За підсумками аналізу літературних джерел та формалізації предметної області, запропоновано наступний план проведення експерименту:

- провести аналіз та формалізацію ключових нормативних вимог у вигляді набору алгоритмічних правил та обмежень;
- розробка методики автоматизованої генерації наборів приміщень (операційна, передопераційна та склад стерильних матеріалів);
- визначити ключові критерії порівняльного оцінювання згенерованих сцен;
- програмно реалізувати розроблений алгоритм у вигляді прототипу в середовищі Unity;
- провести оцінювання отриманої сцени шляхом порівняння з аналогом (еталонною сценою, створеною методом ручного моделювання), з використанням методу експертних оцінок та кількісних вимірювань.

Очікується, що ефективність запропонованої методики автоматизованої генерації, її здатність створювати функціонально коректні та водночас варіативні сцени, буде підтверджена комплексним оцінюванням.

3.3 Хід експерименту

3.3.1 Формалізація нормативних вимог

Моделювання приміщень спеціального призначення, зокрема операційних блоків закладів охорони здоров'я, неможливе без попередньої формалізації чинних нормативних вимог. На відміну від традиційного проєктування, де нормативи застосовуються експертом вручну, у задачах автоматизованої генерації тривимірних сцен виникає необхідність перетворення текстових регламентів на формалізовану систему параметрів, обмежень та правил, придатних для алгоритмічної обробки.

Нормативну базу дослідження склали Державні будівельні норми України ДБН В.2.2-10:2022 «Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я», а

також чинні державні санітарні правила, що регламентують вимоги до операційних блоків. У процесі формалізації нормативні положення було систематизовано за функціональними категоріями та подано у вигляді ієрархічної моделі вимог.

Процес формалізації здійснювався у декілька послідовних етапів:

- ідентифікація нормативних параметрів;
- класифікація вимог на архітектурні та предметні;
- перетворення вимог у систему обмежень;
- групування вимог за типами приміщень.

Геометричні параметри приміщень формалізовано у вигляді мінімально допустимих та рекомендованих значень площі, ширини, довжини та висоти. Для операційних залів встановлено мінімальну площу 30 м² при реконструкції та 42 м² для нового будівництва, мінімальну ширину і довжину 6 м, а також мінімальну висоту 3 м (або 2,5 м при реконструкції за умови забезпечення нормативного повітрообміну). Для допоміжних приміщень, таких як передопераційна та стерильний склад, застосовано менш жорсткі обмеження відповідно до нормативів.

Параметри мікроклімату подано у вигляді допустимих діапазонів температури повітря (18–24 °С), відносної вологості (30–60 %) та кратності повітрообміну (не менше 20 об/год для операційних). Світлотехнічні вимоги представлено через мінімальні значення освітленості робочої зони (не менше 400 лк), допустимі діапазони колірної температури світла (2400–6800 К) та обмеження щодо рівня мерехтіння освітлення, який не повинен перевищувати 10 %. Це дозволяє алгоритмічно перевіряти відповідність освітлювальних сценаріїв нормативам.

Конструктивні вимоги включають параметри дверних прорізів та шляхів переміщення. Мінімальна ширина дверей у чистоті для операційних залів визначена на рівні 1,7 м з обов'язковою відсутністю порогів. Такі вимоги формалізовані як жорсткі геометричні обмеження, що безпосередньо впливають на генерацію архітектурної оболонки приміщення.

Вимоги до оздоблювальних матеріалів описано через набір логічних атрибутів: вологостійкість, хімічна стійкість, безшовність та легкість у прибиранні. Окремо враховано нормативну вимогу щодо формування галтелі між підлогою та стінами висотою не менше 150 мм у стерильних зонах та 80 мм в інших приміщеннях. Такі параметри використовуються як критерії вибору допустимих матеріалів під час генерації.

Інженерні та функціональні вимоги охоплюють наявність та кількість точок медичних газів, електропостачання та санітарного обладнання. Для операційних формалізовано вимоги щодо мінімальної кількості точок подачі кисню, вакууму, медичного повітря, а також вимоги до категорії надійності електропостачання та кількості розеток у зоні операційного столу.

Для підтримки навчальних сценаріїв окремо сформовано модель можливих нормативних порушень, де кожне порушення описується типом, локалізацією, параметрами відхилення та посиланням на відповідний нормативний документ. Це дозволяє контролювати генерувати як нормативно-коректні, так і навмисно помилкові конфігурації приміщень. У результаті було сформовано таблицю параметрів для кожного об'єкта системи (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Фрагмент таблиці формалізації вимог

| Назва об'єкту | Коректна реалізація | Помилкова реалізація |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Підлога операційного приміщення | Модель 1c1; текстура 0c1, 0c2, 0c3, 0c4, 0c5, 0c6, 0c7 або 0c8 | Модель 1w1 або 1w2; текстура 0w1, 0w2, 0w3, 0w4, 0w5, 0w6 або 0w7 |
| Світильник стельовий | Наявність об'єкту; 4, 5 або 6 екземплярів; модель 6c1, 6c2, 6c3 або 6c4; текстура 0c38 або 0c39 | Відсутність об'єкту; модель 6w1, 6w2 або 6w3; текстура 0w28, 0w29 або 0w30 |
| Стіл операційний | Наявність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; 1 екземпляр; модель 10c1, 10c2 або 10c3; текстура основи 0c29, 0c30, 0c31 або 0c32, робочої поверхні – 0c36, 0c37 або 0c38 | Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; 2-3 екземпляри; текстура робочої поверхні 0w33, 0w34, 0w35, 0w36 або 0w37 |

Продовження таблиці 3.1

| Назва об'єкту | Коректна реалізація | Помилкова реалізація |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Рухома хірургічна безтіньова лампа | Наявність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; модель 10c4 або 10c5; текстура 10c1c1, 10c1c2, 10c2c1 | Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати |
| Дифузор ламінарного повітряного потоку | Наявність об'єкту в межах операційної кімнати; модель 5c1 або 5c2; текстура 5c1c1, 5c2c1 або 5c2c2 | Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати; модель 5w1; текстура 5c2w1 |
| Монітор індикації | Наявність об'єкту в межах операційної кімнати; модель 10c11; текстура 10c11c1 або 10c11c2; відображення значень параметрів мікроклімату | Відсутність об'єкту в межах моделі операційної кімнати |
| Кран водопровідний | Об'єкт розташовано відповідно до розташування медичної раковини для миття рук; модель 10c16; текстура 0c29 | Модель 10w7 або 10w8; текстура 0w31 |
| Кисневий балон | Відсутність моделі | Наявність моделі (модель 12w8, текстура 12w8c1) |
| Вентиляційна решітка видалення повітря нижньої зони | Наявність моделі; 4 екземпляри; розташування на рівні 0,15-0,32 м вище підлоги; модель 5c4 або 5c5; текстура 0c29, 0c30 або 0c32 | Відсутність моделі; 1-3 екземпляри; розташування на 0,4-0,6 м вище підлоги |

Результатом даного етапу стала цілісна формалізована модель нормативних вимог, що забезпечує можливість їх інтеграції в алгоритми процедурної генерації. Там вони виражені як задані вимоги значень у відповідних методах та класах (рис. 3.1).

Створена система обмежень слугує фундаментом для автоматизованого створення тривимірних сцен операційних блоків з гарантованим дотриманням або контрольованим порушенням нормативів.

```

{
    private void InitializeRoomRequirements()
    {
        roomRequirements = new Dictionary<string, RoomRequirements>
        {
            ["Airlock"] = new RoomRequirements {
                minArea = 6f, maxArea = 10f, minWidth = 2.0f, minLength = 2.5f,
                connections = new[] { "Sanitization" }, hasExternalDoor = true
            },
            ["Sanitization"] = new RoomRequirements {
                minArea = 12f, maxArea = 18f, minWidth = 3f, minLength = 3f,
                connections = new[] { "Airlock", "Corridor" }
            },
            ["Corridor"] = new RoomRequirements {
                minWidth = 3.5f, maxWidth = 4.0f, minLength = 8f, maxLength = 15f, isCorridor = true,
                connections = new[] { "Sanitization", "PrepPersonnel", "PrepPatient", "SterileStorage?", "Technical?" }
            },
            ["PrepPersonnel"] = new RoomRequirements {
                minArea = 15f, maxArea = 22f, minWidth = 3f, minLength = 3f,
                connections = new[] { "Corridor", "Operating" }
            },
            ["PrepPatient"] = new RoomRequirements {
                minArea = 14f, maxArea = 20f, minWidth = 3.5f, minLength = 3.5f,
                connections = new[] { "Corridor" }, hasExternalDoor = true
            },
            ["Operating"] = new RoomRequirements {
                minArea = 36f, maxArea = 48f, minWidth = 5f, minLength = 5f,
                connections = new[] { "PrepPersonnel", "PostOp", "SterileStorage?", "Sterilization?" }
            },
            ["PostOp"] = new RoomRequirements {
                minArea = 18f, maxArea = 26f, minWidth = 4f, minLength = 3.5f,
                connections = new[] { "Operating" }, hasExternalDoor = true
            },
            ["SterileStorage"] = new RoomRequirements {
                minArea = 10f, maxArea = 14f, minWidth = 3f, minLength = 3f,
                connections = new[] { "Operating|Corridor" }, isOptional = true, spawnChance = 0.6f
            },
            ["Sterilization"] = new RoomRequirements {
                minArea = 14f, maxArea = 20f, minWidth = 3.5f, minLength = 3.5f,
                connections = new[] { "Operating" }, isOptional = true, spawnChance = 0.4f
            },
            ["Technical"] = new RoomRequirements {

```

Рисунок 3.1 – Фрагмент методу з визначеними вимогами до розміру та розташування кімнат блоку

3.3.2 Методика генерації приміщень

На основі формалізованих нормативних вимог було розроблено методику автоматизованої генерації конфігурацій приміщень операційного блоку. Центральним компонентом реалізації є клас GridRoomPlacer, що відповідає за просторове розміщення приміщень на основі сітчастої системи координат.

Методика базується на підході поетапної генерації з пріоритезацією елементів. На першому етапі система визначає базові параметри кожного приміщення. Для операційної зали розміри обираються випадковим чином у межах від мінімально допустимих до максимально раціональних значень. Ширина варіюється від 6 м до 8 м, довжина від 6 м до 8 м, що забезпечує площу в діапазоні від нормативних 30-36 м² до комфортних 64 м². Висота приміщення встановлюється на рівні 3 м для забезпечення достатнього об'єму повітря та можливості розміщення стельового обладнання.

Для передопераційної розміри встановлюються менш жорстко з мінімальною шириною 3 м, довжиною 4 м та такою самою висотою 3 м. Стерильний склад має мінімальні розміри 3 м на 3 м з висотою 3 м. Така конфігурація забезпечує дотримання нормативної вимоги мінімум 10 м² площі на одну операційну для стерильного зберігання.

Після визначення розмірів система переходить до розміщення приміщень у просторі. Реалізовано алгоритм розміщення на основі сітки з розміром комірки 1 м. Це дозволяє точно контролювати взаємне розташування приміщень та забезпечувати правильну топологію операційного блоку. Операційна зала розміщується в центральній зоні доступного простору. Передопераційна позиціонується безпосередньо поруч з операційною, забезпечуючи прямий зв'язок через шлюзову зону. Стерильний склад розташовується з іншого боку операційної для забезпечення короткого шляху транспортування стерильних матеріалів та інструментів.

Система автоматично генерує дверні прорізи між приміщеннями відповідно до нормативних вимог. Двері між передопераційною та операційною мають ширину 1.7 м у чистоті без порогів. Аналогічні параметри застосовуються для дверей між операційною та стерильним складом. Для входу до передопераційної з коридору генерується двері шириною 1.5 м.

Наступним критичним етапом є створення архітектурних елементів приміщень. Підлога генерується з урахуванням вимоги про наявність галтелі. Система автоматично додає закруглений перехід висотою 150 мм по всьому периметру операційної та стерильного складу. Для передопераційної висота галтелі встановлюється на рівні 80 мм відповідно до менш жорстких вимог.

Матеріали підлоги обираються випадковим чином з попередньо підготовленого набору. Для коректних варіантів це текстури, що імітують полімерні наливні підлоги світлих тонів, гладкі безшовні покриття або керамогранітні плити великого формату. Система також містить набір помилкових текстур з пористою структурою або видимими швами для можливості генерації навчальних сценаріїв з порушеннями.

Стіни створюються як вертикальні площини з товщиною 200 мм. Особливу увагу приділено формуванню кутових з'єднань. У операційній залі кути генеруються з невеликим радіусом закруглення для запобігання накопиченню забруднень. Матеріали стін обираються з набору гладких фарбованих поверхонь світлих тонів або керамічних плиток з глазурованою поверхнею.

Стеля генерується як суцільна площина на заданій висоті. До неї автоматично прикріплюються критично важливі елементи систем життєзабезпечення. Для операційної це насамперед дифузор ламінарного потоку повітря, розташований безпосередньо над зоною операційного столу. Також генеруються точки кріплення для стельових світильників та безтіньової хірургічної лампи.

Після створення архітектурної оболонки система переходить до наповнення приміщень функціональним обладнанням. Розміщення об'єктів відбувається відповідно до системи пріоритетів. Найвищий пріоритет має операційний стіл як центральний елемент операційної. Він розміщується у центральній зоні приблизно на рівних відстанях від стін з координатами, що підпадають під зону дії ламінарного потоку.

Безтіньова хірургічна лампа розміщується безпосередньо над операційним столом з мінімальним відхиленням координат. Анестезіологічна стійка позиціонується в головах операційного столу на відстані 400 мм. Столи для хірургічних інструментів розміщуються збоку від операційного столу на відстані 1200-1500 мм, що відповідає зоні комфортної досяжності для хірурга.

Для кожного об'єкта система виконує перевірку на відсутність колізій з уже розміщеними елементами. Визначається габаритний контур об'єкта з додатковим запасом 100 мм для імітації реального зазору. Якщо виявлено перетин з іншим об'єктом, генерується нова позиція. Процес повторюється максимум 50 разів, після чого, якщо допустиму позицію знайти не вдалось, об'єкт позначається як нерозміщений.

Додатково система перевіряє дотримання вимог доступності. Будується граф можливих шляхів переміщення у приміщенні та перевіряється наявність проходів достатньої ширини між усіма ключовими точками. Мінімальна ширина основних проходів встановлена на рівні 1200 мм. Навколо операційного столу має залишатись вільна зона шириною 1000 мм по всьому периметру.

У передопераційній генерується медична раковина для миття рук з безконтактним змішувачем. Раковина розміщується біля стіни на відстані не менше 1250 мм від зони зберігання стерильних матеріалів для запобігання забруднення бризками води. У стерильному складі генеруються стелажі для зберігання інструментів та матеріалів з дотриманням вимоги про відсутність раковин у стерильних зонах.

Для забезпечення візуальної варіативності кожен об'єкт може бути представлений кількома альтернативними тривимірними моделями. Наприклад, операційний стіл має три варіанти моделей від класичного механічного до сучасного електромеханічного. Безтіньова лампа представлена однокупольним та двокупольним варіантами. Кожна модель може комбінуватись з різними текстурами металевої основи та робочих поверхонь.

Система також генерує параметри мікроклімату для кожного приміщення. Для операційної температура обирається випадковим чином у нормативному діапазоні 21-24°C, вологість 50-60%, кратність повітрообміну 20-25 об/год. Ці значення відображаються на віртуальному моніторі індикації параметрів повітря, розміщеному на стіні на висоті 1.6 м.

Освітлення генерується з урахуванням вимог до операційних приміщень. Створюються стельові світильники у кількості від чотирьох до шести екземплярів залежно від площі приміщення. Кожному світильнику призначається інтенсивність для забезпечення загальної освітленості 400-500 люксів та колірна температура 4200 К, що відповідає нейтрально-білому світлу близькому до денного.

3.3.3 Програмна реалізація методики

Для програмної реалізації розробленої методики було обрано ігровий рушій Unity версії 2021.3 LTS з використанням мови програмування C# (рис. 3.2). Цей вибір обумовлений наявністю потужних інструментів для роботи з тривимірною графікою, фізичними симуляціями, системами освітлення та можливістю створення інтерактивних застосунків з перспективи першої особи.

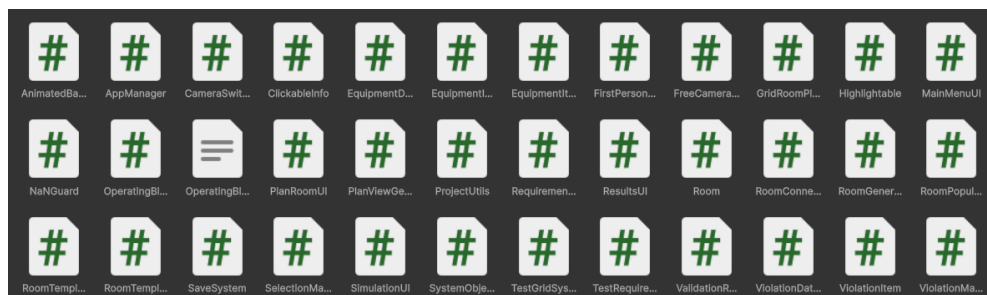


Рисунок 3.2 – Створені файли коду

Архітектура програмного прототипу побудована на модульному принципі з чітким розділенням відповідальності між компонентами. Базовим елементом є клас `OperatingBlockRequirements`, що містить всю формалізовану інформацію про нормативні вимоги. Цей клас реалізовано як статичний репозиторій даних, доступний з будь-якої частини системи.

Центральним компонентом генерації є клас `GridRoomPlacer`, успадкований від `MonoBehaviour` для інтеграції з життєвим циклом Unity. Цей компонент прикріплюється до порожнього ігрового об'єкта на сцені та відповідає за весь процес створення конфігурації приміщень. У полях класу зберігаються посилання на префаби всіх необхідних об'єктів, параметри сітки розміщення та налаштування генерації.

Метод `Start()` запускається при ініціалізації сцени та викликає послідовність методів генерації. Спочатку виконується `GenerateRoomDimensions()`, що випадковим чином визначає розміри кожного

приміщення в межах нормативних діапазонів. Результати зберігаються у структурі даних `RoomConfiguration`, що містить ширину, довжину, висоту та тип кожного приміщення.

Наступним викликається метод `PlaceRoomsOnGrid()`, що реалізує логіку просторового розміщення. Метод оперує двовимірним масивом булевих значень, що представляє сітку доступного простору. Спочатку весь простір позначається як вільний. Потім послідовно для кожного приміщення знаходиться відповідна незайнята ділянка сітки необхідного розміру. Комірки, зайняті приміщенням, позначаються як використані для запобігання накладенням.

Після визначення позицій приміщень викликається метод `GenerateArchitecture()`, що створює фізичні об'єкти архітектурних елементів. Для кожної стіни створюється екземпляр префабу `WallPrefab` з відповідними параметрами трансформації. Позиція встановлюється на основі координат сітки, масштаб визначає довжину та висоту стіни. Аналогічно створюються об'єкти підлоги та стелі.

Особливу увагу приділено реалізації галтелі підлоги. Для цього створено спеціальний префаб `FloorCovePrefab`, що містить модель з закругленим профілем. Цей префаб інстанціюється вздовж всього периметру приміщення з автоматичним обчисленням необхідних поворотів для коректного з'єднання в кутах.

Матеріали об'єктів призначаються через компонент `Renderer`. У полях класу `GridRoomPlacer` зберігаються масиви доступних матеріалів, розділених на коректні та помилкові варіанти. Метод `AssignMaterial()` випадковим чином обирає матеріал з відповідного набору та застосовує його до об'єкта через `renderer.material = selectedMaterial`.

Генерація дверних прорізів реалізована через метод `CreateDoorways()`. Для кожної пари суміжних приміщень визначається спільна стіна та обчислюється центральна точка на ній. У цій точці створюється екземпляр префабу `DoorPrefab` з відповідною шириною відповідно до типу приміщень. Для дверей між

операційною та передопераційною ширина встановлюється 1.7 м, для інших типів з'єднань застосовуються відповідні нормативні значення.

Після створення архітектурної оболонки запускається метод `PopulateRoomsWithEquipment()`, що відповідає за розміщення функціонального обладнання. Цей метод ітерується по списку типів об'єктів у порядку пріоритетів. Для кожного типу викликається метод `PlaceEquipmentItem()`, що реалізує логіку пошуку допустимої позиції з урахуванням обмежень.

Метод `PlaceEquipmentItem()` спочатку визначає зону допустимих позицій на основі правил, зберіг в компоненті `EquipmentData`, прикріпленого до префабу об'єкта. Потім у циклі генеруються випадкові координати в межах цієї зони. Для кожної кандидат-позиції викликається метод `CheckCollisions()`, що використовує `Physics.OverlapBox()` для виявлення перетинів з іншими об'єктами. Якщо колізії відсутні, викликається `CheckPathAccessibility()` для перевірки збереження проходів. За успішної перевірки об'єкт створюється на сцені через `Instantiate()`.

Компонент `EquipmentData` реалізовано як `ScriptableObject`, що прикріплюється до кожного префабу обладнання. Він містить списки допустимих та помилкових моделей у вигляді посилань на меші, списки відповідних матеріалів, параметри зон розміщення та теги можливих порушень. Такий підхід дозволяє централізовано зберігати всю інформацію про об'єкт поруч з його тривимірною моделлю.

Механізм впровадження порушень реалізовано через метод `DistributeViolations()`, що викликається перед початком генерації. Метод приймає на вхід загальну кількість помилок та розподіляє їх між етапами генерації випадковим чином з дотриманням максимальних лімітів на групу. Результат зберігається у словнику `violationsPerStage`, що використовується на відповідних етапах генерації.

При створенні кожного об'єкта перевіряється, чи заплановано для нього порушення. Якщо так, викликається метод `ApplyViolation()`, що випадковим

чином обирає тип порушення з доступних тегів об'єкта та застосовує відповідну помилкову реалізацію. Наприклад, для порушення типу "material" замість випадкового вибору з `correctMaterials` використовується `incorrectMaterials`. Інформація про створене порушення додається до списку `generatedViolations` для подальшого оцінювання дій користувача.

Генерація параметрів мікроклімату виконується методом `GenerateMicroclimate()`. Для кожного приміщення створюється екземпляр структури `MicroclimateParameters` з випадковими значеннями температури, вологості та повітрообміну. Якщо для даного приміщення заплановано порушення мікроклімату, один з параметрів генерується поза нормативним діапазоном. Ці значення передаються компоненту `ClimateMonitorDisplay`, прикріпленому до об'єкта монітора на стіні, який відображає їх на екрані через оновлення текстових елементів UI.

Система освітлення налаштовується методом `SetupLighting()`. Для кожного стельового світильника створюється компонент `Light` типу `Spot` або `Area` залежно від моделі світильника. Параметр `intensity` розраховується так, щоб сумарна освітленість відповідала нормативним 400-500 люксам. Колірна температура встановлюється через властивість `colorTemperature`, що приймає значення в Кельвінах. Для безтіньової хірургічної лампи створюється окремий компонент `Light` з дуже високою інтенсивністю та спеціальним розподілом світла через налаштування `cookie`.

Глобальне освітлення налаштовується через `RenderSettings`. Параметр `ambientMode` встановлюється на `AmbientMode.Flat`, а `ambientLight` отримує світло-сірий колір для імітації розсіяного освітлення від усіх поверхонь. Для імітації часу доби генерується скайбокс через випадковий вибір з попередньо підготовлених варіантів та призначення його до `RenderSettings.skybox`.

Інтерактивна взаємодія користувача реалізована через стандартний компонент `CharacterController` для переміщення камери першої особи. До камери прикріплено компонент `PlayerInteraction`, що відстежує натискання лівої кнопки миші та виконує `Raycast` для визначення об'єкта під курсором.

Якщо об'єкт має компонент `InteractableObject`, викликається його метод `OnInteract()`, що відображає інформаційне вікно з описом об'єкта та можливими варіантами оцінки його коректності.

Компонент `ValidationManager` відповідає за збір та оцінювання відповідей користувача. Він порівнює вибір користувача зі списком `generatedViolations` та обчислює відсоток правильно виявлених порушень. Результати відображаються в кінцевому звіті через UI-панель з детальною статистикою.

Для забезпечення стабільної роботи реалізовано систему обробки помилок. Усі критичні операції обгорнуто в блоки `try-catch` з логуванням винятків через `Debug.LogError()`. Після завершення генерації викликається метод `ValidateGeneration()`, що перевіряє повноту конфігурації, відсутність критичних колізій та відповідність кількості порушень заданій. За виявлення критичних проблем вся генерація перезапускається з новими випадковими параметрами.

Результатом програмної реалізації став повнофункціональний прототип системи автоматизованої генерації операційних блоків, здатний створювати унікальні нормативно-коректні конфігурації приміщень з контрольованим впровадженням порушень.

3.4 Результати експерименту

Для проведення експериментального дослідження було створено дві альтернативні реалізації операційного приміщення. Перша (надалі альтернатива А, рис. 3.1-3.2) представляє собою сцену, згенеровану розробленим програмним прототипом у середовищі `Unity`. Друга альтернатива (надалі альтернатива Б, рис. 3.3-3.4) являє собою сцену, створену традиційним методом ручного моделювання в середовищі `Blender` з подальшим експортом статичних рендерів. Обидві сцени використовують однаковий набір тривимірних моделей обладнання та текстур для забезпечення коректності порівняння.



Рисунок 3.1 – Згруповані об'єкти в середовищі Blender

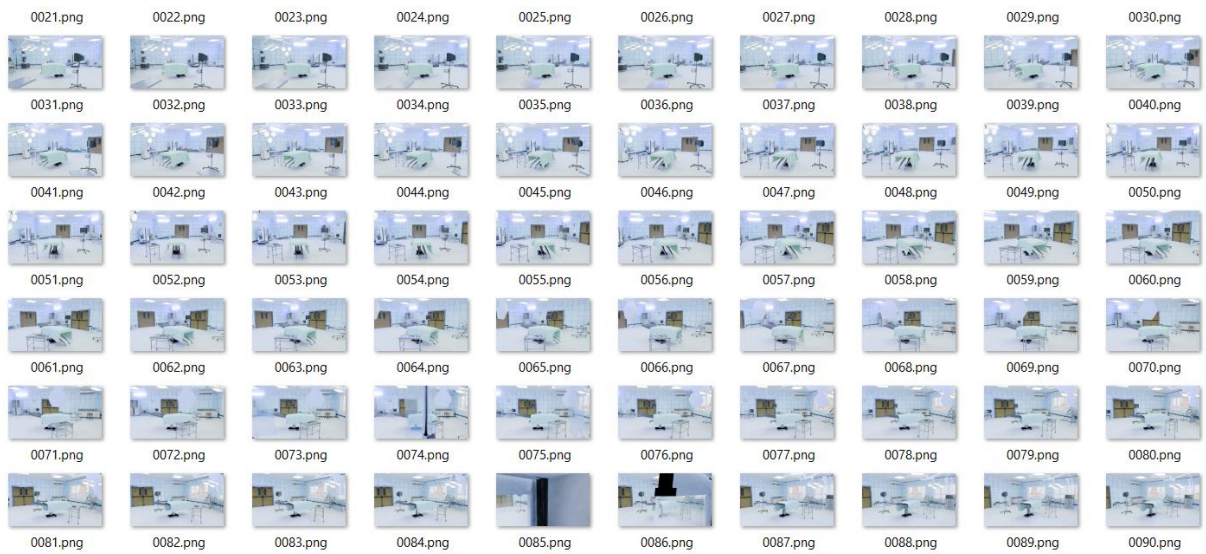


Рисунок 3.2 – Представлення групи моделей у вигляді рендерів



Рисунок 3.3 – Згруповані моделі за допомогою програмного середовища Unity



Рисунок 3.4 – Можливість огляду створеної моделі від першої особи

В експертному оцінюванні взяли участь п'ять експертів; дослідження проводилось у два етапи відповідно до методології вагових коефіцієнтів з визначенням узгодженості думок експертів через коефіцієнт конкордації Кендалла.

3.4.1 Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв оцінювання

На підготовчому етапі експертам було запропоновано оцінити сім критеріїв за ступенем їх важливості для оцінки якості створеного віртуального середовища операційного приміщення. Використовувалась 7-бальна шкала, де 7 балів присвоюється найбільш важливому критерію, а 1 бал найменш важливому. До переліку критеріїв увійшли відповідність нормативам, логічність розміщення обладнання, варіативність можливих конфігурацій, візуальна якість відображення, інформативність системи, технічна доступність для кінцевих користувачів та часові і ресурсні витрати на створення.

Результати оцінювання експертами вагомості кожного критерію представлені у таблиці 3.2. Вага кожного критерію обчислюється як відношення його рядкової суми до загальної суми всіх оцінок.

Таблиця 3.2 – Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв

| № з/п | Критерій | Ек. 1 | Ек. 2 | Ек. 3 | Ек. 4 | Ек. 5 | Сума | Вага (k _j) | Відх. | S |
|-------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------------------------|-------|--------|
| 1 | Відповідність нормативам | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 34 | 0.243 | 13.2 | 174.24 |
| 2 | Логічність розміщення | 6 | 6 | 6 | 7 | 6 | 31 | 0.221 | 10.2 | 104.04 |
| 3 | Варіативність | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 25 | 0.179 | 4.2 | 17.64 |
| 4 | Візуальна якість | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 19 | 0.136 | -1.8 | 3.24 |
| 5 | Інформативність | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 16 | 0.114 | -4.8 | 23.04 |
| 6 | Технічна доступність | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 | 0.071 | -10.8 | 116.64 |
| 7 | Час і ресурси | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 | 0.036 | -15.8 | 249.64 |
| | Разом | | | | | | 140 | 1.000 | | 688.48 |

Середнє значення рядкової суми становить 20,0. Для визначення коефіцієнта конкордації (узгодженості думок) використовується формула:

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)}, \quad (3.1)$$

$$S = 32,15 + 7,13 + 69,39 = 108,67.$$

де $n=5$ (експерти),
 $m=3$ (критерії).

Підставляючи значення, отримуємо $W = 0,984$. Отримане значення коефіцієнта конкордації вказує на дуже високу узгодженість думок експертів. За загальноприйнятою інтерпретацією, значення понад 0,7 свідчить про високий рівень узгодженості, а понад 0.9 характеризує майже повну однотайність експертних оцінок. Таким чином, можна стверджувати, що експерти мають спільне розуміння відносної важливості критеріїв оцінювання.

Результати оцінювання виявили, що найвищий пріоритет експерти надали критерію відповідності нормативам, що обґрунтовано специфікою медичних приміщень. Логічність розміщення отримала ваговий коефіцієнт з другим за величиною значенням, що відображає її вплив на ефективність

роботи персоналу. Варіативність посіла третє місце, підтверджуючи значущість можливості генерації різноманітних конфігурацій. Критерії візуальної якості, інформативності, технічної доступності і часових витрат є на думку експертів не першочерговими для застосування, що відповідно вказує на їхню вторинність відносно функціональних характеристик системи.

3.4.2 Порівняльний аналіз альтернатив

На другому етапі експертам були представлені дві альтернативні реалізації операційного приміщення для порівняльного оцінювання за визначеними критеріями. Оцінювання проводилось за 9-бальною шкалою, де 9 балів відповідає винятковій якості, 7-8 – дуже високий, 5-6 – хороший з незначними недоліками, 3-4 – задовільний, а 1-2 – незадовільний.

Альтернатива А (табл. 3.3) представляє інтерактивний застосунок у середовищі Unity з можливістю вільного пересування від першої особи, детального огляду об'єктів, отримання інформаційних вікон і перегляду віртуальних моніторів мікроклімату. Альтернатива Б являє собою набір статичних рендерів, створених у Blender.

Таблиця 3.3 – Оцінка Альтернативи А (Unity) за критеріями

| № | Критерій | Ек. 1 | Ек. 2 | Ек. 3 | Ек. 4 | Ек. 5 | Сума |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | Відповідність нормативам | 9 | 9 | 8 | 8 | 9 | 43 |
| 2 | Логічність розміщення | 7 | 6 | 7 | 6 | 7 | 33 |
| 3 | Варіативність | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 45 |
| 4 | Візуальна якість | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 34 |
| 5 | Інформативність | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 41 |
| 6 | Технічна доступність | 7 | 7 | 8 | 7 | 6 | 35 |
| 7 | Час і ресурси | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 45 |

Альтернатива А отримала дуже високу оцінку за відповідність нормативам, оскільки автоматична генерація забезпечує гарантоване дотримання формалізованих правил для розмірів приміщень, параметрів

мікроклімату та освітлення. Середньо оцінили логічність розміщення: алгоритм забезпечує дотримання формальних вимог до відстаней і проходів, проте не завжди досягає рівня професійної роботи в тонкій оптимізації взаємного розташування об'єктів.

Варіативність і часові витрати ж отримали максимальні оцінки, що пояснюється можливістю генерувати необмежену кількість унікальних конфігурацій за 4 секунди без участі людини, що є винятковим результатом порівняно з традиційними методами компоновання та створення тривимірних середовищ.

Альтернатива Б отримала високі оцінки (табл. 3.4) за відповідністю нормативам і логічністю розміщення завдяки врахуванню ергономічних нюансів досвідченим виконувачем роботи. Візуальна якість оцінена також високо через результати рендеру Cycles. Проте за інформативністю альтернатива отримала низькі оцінки через обмеженість статичних рендерів, а за часовими витратами – найнижчу, оскільки створення однієї конфігурації займає 8 годин, що в 240–320 разів повільніше за автоматизований підхід.

Таблиця 3.4 – Оцінка Альтернативи Б (Blender) за критеріями

| № | Критерій | Ек. 1 | Ек. 2 | Ек. 3 | Ек. 4 | Ек. 5 | Сума |
|---|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 1 | Відповідність нормативам | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 | 41 |
| 2 | Логічність розміщення | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 42 |
| 3 | Варіативність | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 45 |
| 4 | Візуальна якість | 8 | 9 | 8 | 9 | 8 | 42 |
| 5 | Інформативність | 4 | 4 | 5 | 4 | 4 | 21 |
| 6 | Технічна доступність | 6 | 7 | 6 | 7 | 6 | 32 |
| 7 | Час і ресурси | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 10 |

3.4.3 Розрахунок комплексних оцінок та інтерпретація результатів

Для підведення підсумку були розраховані комплексні вагові коефіцієнти Q для кожної альтернативи:

$$Q_i = \sum_{j=1}^3 (k_j \cdot w_j), \quad (3.2)$$

де k_j – вага критерію,

w_{ij} – вага альтернативи за j -м критерієм.

За результатами розрахунків Альтернатива А отримала значення комплексного вагового коефіцієнту 0,513, що дещо перевищує показник Альтернативи Б (0,487). Нормалізоване значення обчислювалось як відношення оцінки альтернативи до суми оцінок обох альтернатив за кожним критерієм. Різниця в 5 % вказує на порівнянну якість обох підходів з невеликою перевагою автоматизованого методу.

Альтернатива А продемонструвала перевагу за критеріями інформативності, технічної доступності та особливо часових витрат, де різниця сягає двох порядків величини. Проте цей критерій має найменшу вагу, тому його вплив на результуюче значення низький. Альтернатива Б показала кращі результати за логічністю розміщення та візуальною якістю завдяки врахуванню виконавцем тонких деталей та правдоподібності сцени, що складно реалізувати автоматично.

За найважливішим критерієм відповідності нормативам обидві альтернативи показали близькі дуже високі результати. За варіативністю альтернативи отримали однакові оцінки, оскільки вона визначається розміром базового набору моделей, а не способом компоновання.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про ефективність автоматизованого підходу, проте демонструють, що традиційний метод зберігає переваги завдяки людській роботі. Порівняно невелика різниця в оцінках вказує, що обидва підходи мають своє місце в практиці, і вибір методу має залежати від конкретних цілей проекту.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Характеристика науково-дослідного рішення

Метою даного розділу є економічне обґрунтування витрат на проведення науково-дослідної роботи (НДР), в межах якої передбачається дослідження проблеми автоматизації процесу створення тривимірних моделей приміщень на базі готового набору моделей та текстур. Під час такого обґрунтування буде здійснено: розрахунок трудовитрат та заробітної плати працівникам, розрахунок одноразових витрат і прибутку, оцінку результатів НДР.

Реалізація НДР передбачає такі етапи:

- аналіз предметної області;
- визначення алгоритму реалізації проєкту;
- дослідження використання процедурної генерації для автоматичного створення моделей приміщень;
- вибір методів для проведення експерименту;
- складання методики генерації з урахуванням нормативів;
- доведення дійсності роботи методики.

4.2 Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата

Під час виконання НДР було проведено огляд існуючих теоретичних підходів у даній галузі, досліджено основні методи та алгоритми процедурної генерації тривимірних моделей приміщень. Умовно НДР можна розділити на три етапи: підготовчий, основний і заключний.

На стадії виконання підготовчого етапу було виконано підбір і аналіз інформації для проведення відповідних до постановки завдання робіт. Проведено пошук інформації в мережі Internet та у фаховій літературі.

На етапі виконання основної частини НДР було здійснено такі роботи: розгляд методів процедурної генерації у Unity для автоматичного створення моделей приміщень;

- аналіз розглянутих методів та відбір за певними критеріями;
- розробка методики для створення моделей з набору моделей та текстур;
- доведення працездатності запропонованої методики.

У заключній частині проводяться: аналіз результатів виконання НДР, складання звіту з НДР та його захист.

Найбільш складною та відповідальною частиною при плануванні НДР є розрахунок трудомісткості робіт, тому що трудові витрати часто становлять основну частину вартості науково-дослідних робіт і безпосередньо впливають на строки розробки.

Дану роботу виконували 4 фахівці: Unity-розробник, менеджер проєкту, 3D-дженераліст та інженер програмного забезпечення. Середня заробітна плата Unity-розробника за версією сайту jooble.ua становить 32 000,00 грн, інженера ПЗ – 24 000,00 грн, 3D-дженераліста – 28 000,00 грн, менеджера проєкту – 22 000,00 грн.

Проведемо розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавця робіт.

Середньоденна заробітна плата виконавця робіт ($Z_{ср.дн.}$):

$$Z_{ср.дн.} = \frac{Z_{ср.міс.}}{n}, \quad (4.1)$$

де $Z_{ср.міс.}$ – середньомісячна зарплата виконавця роботи;

n – число робочих днів у місяці, ($n=22$).

Підставивши дані до (4.1), отримаємо середньоденну заробітну плату Unity-розробника у розмірі 1454,55 грн, інженера ПЗ – 1090,91 грн, 3D-дженераліста – 1272,73 грн, менеджера проєкту – 1000,00 грн.

Етапи виконання НДР, перелік і зміст робіт, трудомісткість їх виконання, заробітна плата виконавців робіт представлені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавців робіт

| Перелік робіт | Кількість виконавців | Посада виконавця | Трудо-місткість робіт, люд.-днів | Середньоденна заробітна плата, грн | Сума заробітної плати, грн |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| 1. Підготовчий етап | | | | | |
| 1.1. Розробка та затвердження ТЗ | 1 | Менеджер проекту | 2 | 1000,00 | 2000,00 |
| 1.2 Підготовка довідкових матеріалів та даних для виконання НДР | 1 | Менеджер проекту | 2 | 1000,00 | 2000,00 |
| 2. Основний етап | | | | | |
| 2.1 Постановка задачі | 1 | Менеджер проекту | 1 | 1000,00 | 2000,00 |
| 2.2 Розгляд методів процедурної генерації | 1 | Інженер ПЗ | 3 | 1090,91 | 3272,73 |
| 2.3 Аналіз методів та відбір | 1 | Інженер ПЗ | 3 | 1090,91 | 3272,73 |
| 2.4. Розробка методики автоматизації | 2 | Unity- | 4 | 1454,55 | 5818,20 |
| | | розробник, інженер ПЗ | 4 | 1090,91 | 4363,64 |
| 3 Тестування | | | | | |
| 3.1 Відбір тестових моделей | 1 | 3D-дженераліст | 1 | 1272,73 | 1272,73 |
| 3.2 Підтвердження результату | 1 | 3D-дженераліст | 1 | 1272,73 | 1272,73 |
| 4. Заключний етап | | | | | |
| 4.1 Аналіз результатів проведення роботи | 1 | Менеджер проекту | 2 | 1000,00 | 2000,00 |
| 4.2 Формування висновків та пропозицій за темою дослідження | 1 | Менеджер проекту | 1 | 1000,00 | 1000,00 |
| 4.3 Технічне оформлення звіту виконання НДР | 1 | Менеджер проекту | 2 | 1000,00 | 2000,00 |
| Усього | | | 26 | | 29272,76 |

4.3 Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР

Калькуляція собівартості розраховується відповідно до існуючих нормативних актів України. До складу калькуляції входять такі статті витрат:

- матеріальні витрати;
- витрати на оплату праці;
- єдиний соціальний внесок;

- амортизація основних засобів (вартість машинного часу);
- витрати на спожиту електроенергію;
- інші витрати.

Матеріальні витрати визначаються витратами на матеріали, визначені їх потребою для виконання робіт, і цін, що діють на момент складання калькуляції. Для проведення НДР потрібно: флеш-накопичувач USB (1 шт.), механічний олівець (1 шт.) та блокнот (1 шт.). Дані матеріальні витрати потрібні для менеджера проєкту, Unity-розробника та інженера ПЗ.

Матеріальні витрати розраховуються за такою формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n Q_j \times C_j, \quad (4.2)$$

де M – сумарні витрати на матеріали, в тому числі малоцінні предмети, що швидко зношуються (носії, папір, канцелярське приладдя тощо), або на літературу, яка необхідна для проведення роботи, тощо;

Q_j – кількість використаних одиниць j -го виду матеріалів, $j = (1 \div n)$;

C_j – ціна одиниці j -го виду матеріалів.

Розрахунок матеріальних витрат представлено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Розрахунок матеріальних витрат

| Найменування | Од. вим. | Кількість, (Q_j) | Ціна (C_j), грн | Сумарні витрати на матеріали (M), грн |
|----------------------------|----------|----------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| Олівець механічний | шт. | 1 | 9,00 | 9,00 |
| Блокнот | шт. | 1 | 43,00 | 43,00 |
| Флеш-накопичувач USB 64 Гб | | | 249,00 | 249,00 |
| Усього | | | | 301,00 |

Витрати на оплату праці розраховуються виходячи з необхідного для виконання робіт складу й кількості працівників, а також із середньомісячної заробітної плати. Відповідно до проведених розрахунків витрати на оплату праці виконавців роботи дорівнюють 29 272,76 грн.

Єдиний внесок на загальнодержавне соціальне страхування (ЄСВ) – консолідований страховий внесок, збір якого здійснюється в систему загальнообов’язкового державного соціального страхування в обов’язковому порядку і на регулярній основі з метою забезпечення захисту у випадках, передбачених законодавством, прав застрахованих осіб і членів їх сімей на отримання страхових виплат (послуг) за діючими видами загальнообов’язкового державного соціального страхування.

Ставка єдиного соціального внеску (ЄСВ) дорівнює 22 % від витрат на оплату праці, тобто розмір ЄСВ дорівнює 6 440,01 грн. При виконанні НДР застосовувалися 1 комп’ютер вартістю 28 999,00 грн.

Вищенаведене устаткування є власністю організації виконавця, тому доцільно розрахувати суму амортизаційних відрахувань на період виконання НДР. Амортизація основних засобів розраховується за формулою:

$$AB = \sum_{k=1}^L \frac{BO_k}{T} \times TE_k, \quad (4.3)$$

де AB – сума амортизаційних відрахувань, нарахованих під час проведення науково-дослідницької роботи;

BO_k – вартість основних засобів k -го виду;

TE_k – термін експлуатації основних засобів k -го виду, днів;

T – термін науково-дослідницької роботи, днів;

L – кількість видів обладнання.

Підставивши відомі значення до (4.3), отримаємо величину амортизаційних відрахувань – 989,47 грн.

Витрати на використану обладнанням електроенергію (B_e):

$$B_e = M \cdot t \cdot T_{кВм}, \quad (4.4)$$

де M – потужність устаткування, тобто кількість енергії, споживаної за одиницю часу (кВт / годин);

t – кількість годин використання устаткування за період проведення науково-дослідницької роботи;

$T_{кВт}$ – тариф, тобто вартість використання 1 кВт електроенергії.

Споживна потужність комп'ютера складає 0,5 кВт за годину. Тариф складає 4,32 грн/кВт. Підставивши значення до (4.4), визначимо величину витрат на спожиту електроенергію у розмірі 449,28 грн.

До інших статей витрат відносяться адміністративні витрати (водопостачання, водовідведення, освітлення, опалення), які прийнято у розмірі 20 % від витрат на оплату праці, та вартість оплати послуг зв'язку.

Вартість оплати послуг зв'язку (безлімітний пакет Інтернет) становитиме 350,00 грн за 26 днів виконання НДР.

За час виконання НДР витрати на відрядження, інформаційні послуги та маркетингові заходи не мали місця.

Результати розрахунку кошторису витрат, тобто одноразових витрат, на виконання НДР «Дослідження проблеми автоматизації процесу створення тривимірних моделей приміщень» наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Кошторис витрат на розробку НДР

| № | Стаття витрат | Сума, грн |
|-----|-----------------------------------------|-----------|
| 1 | Заробітна плата | 29 272,76 |
| 2 | Єдиний соціальний внесок (22 % від п.1) | 6 440,01 |
| 3 | Матеріальні витрати | 301,00 |
| 4 | Амортизація основних засобів | 989,47 |
| 5 | Витрати на спожиту електроенергію | 449,28 |
| 6 | Інші витрати, у тому числі: | |
| 6.1 | адміністративні витрати (20 % від п.1) | 5 854,55 |
| 6.2 | вартість послуг зв'язку | 350,00 |
| | Усього витрати на розробку (B_p) | 43 657,07 |

Таким чином, кошторис витрат на виконання даної НДР визначає сумарні витрати за статтями п.1-п.6 та складає 43 657,07 грн.

4.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи

Результат – це завершальний наслідок послідовності дій, виражений якісно або кількісно. В загальному випадку оцінка результатів НДР – це визначення ефективності отриманих рішень порівняно з сучасним науково-технічним рівнем.

Відповідно до теми даної роботи можна зробити висновок про те, що результатом впровадження НДР є зменшення ціни та часу на створення набору тривимірних моделей приміщень порівняно з неавтоматичним методом.

Результат від впровадження НДР визначається за формулою:

$$\Delta P_j = |X_{бj} - X_{нj}|, \quad (4.5)$$

де ΔP_j – покращення j -ої характеристики досліджуваного процесу за рахунок впровадження результатів НДР ($j = 1, m$);

m – кількість досліджуваних характеристик;

$X_{бj}$ – базове значення j -ої характеристики;

$X_{нj}$ – нове значення j -ої характеристики після впровадження НДР.

У якості досліджуваної характеристики обрано ціну та час створення тривимірної моделі набору приміщень з їх наповненням із існуючого ряду моделей. До впровадження методики створення набору коштувало 636,00 грн та займало 240 хв. Після впровадження розробленої методики (одноразової розробки) подальша генерація наборів не потребує додаткової оплати праці, ціна їх створення прийнята за 1,00 грн. Час генерації складає 4 с.

Підставивши відповідні значення ціни та часу створення набору до (4.5), визначимо результат від впровадження НДР у чисельному вигляді:

$$\Delta P_1 = |636,00 - 1,00| = 635,00 \text{ грн,}$$

$$\Delta P_2 = |240 - 0,07| = 239,93 \text{ хв.}$$

Аналогічні розрахунки були також проведені для іншого набору та наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Результат від впровадження НДР

| Критерій | Набір 1 | | | Набір 2 | | |
|--------------------|---------|-------|---------|---------|-------|---------|
| | до | після | різниця | до | після | різниця |
| Ціна, грн | 636,00 | 1 | -635,00 | 795,00 | 1 | -794,00 |
| Час виконання, хв. | 240 | 0,07 | -239,93 | 300 | 0,07 | -299,93 |

Таким чином, отриманий результат свідчить про те, що завдяки результату від впровадження НДР набори, створені за допомогою розробленої методики, мають значно меншу ціну та час створення. Роботу в цілому можна вважати ефективною або такою, що має високий науковий та технічний рівень.

ВИСНОВКИ

У дослідженні відповідно до завдання проведений аналіз літератури за темою кваліфікаційної роботи й розглянуті основні теоретичні засади процедурної генерації 3D-середовищ. Було проаналізовано застосування цих технологій для створення прототипу симулятора генерації систем приміщень спеціального призначення з дотриманням вимог згідно діючих державних нормативів до медичних приміщень.

Для виконання завдань кваліфікаційної роботи було проведено формалізацію чинних гігієнічних та будівельних нормативів для операційних блоків, перетворивши їх на набір правил за переліком відповідних моделей та текстур. На основі виконаного дослідження розроблено методику автоматизованої процедурної генерації, яка забезпечує створення функціонально коректних тривимірних сцен.

У ході виконання роботи на основі виконаного аналізу інформаційних джерел були виявлені та проаналізовані існуючі методи моделювання та існуючі способи автоматизації формування наборів тривимірних моделей з урахуванням особливостей приміщень спеціального призначення. Було створено прототип на основі описаної методики у середовищі ігрового рушія Unity та проведено експериментальне порівняльне оцінювання результатів розроблювального проєкту зі сценою, створеною вручну з аналогічного набору моделей. Було проведено експертне опитування з використанням методу вагових коефіцієнтів.

Результати експериментального дослідження підтвердили гіпотезу дослідження. Було встановлено, що як за допомогою запропонованого сценарію, так і за допомогою звичного методу компоновання моделей в середовищі тривимірного редактора, можливо створювати сцени, що відповідають заданим гігієнічним та будівельним нормам. Однак, запропонований автоматизований метод виявився більш ефективним за

витратами часу, коштів та за рахунок вищої інтерактивності, яка є одним з найбільших переваг використання симуляторів.

Як висновок, можна зазначити, що розроблена методика генерації приміщень спеціального призначення є ефективним способом компонування випадкових наборів з моделей та текстур, що відповідають поставленим вимогам та надають можливість взаємодії з користувачем. Проте слід відмітити, що інтерактивність створюваної системи та її окремі елементи слід розширити задля покращення досвіду користувача.

Таким чином, можна вважати, що результат дослідження відповідає вимогам поставленого завдання, мета дослідження досягнута.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Panagiotis, A., & Stylianos, Z. (2021). Virtual reality in medical education and training. *Journal of Medical Systems*, 45, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10916-021-01234-5>.
2. Pati, D., Harvey, T., & Cason, C. (2021). The architecture of operating rooms: A review of the evidence on design innovations. *Journal of Hospital Administration*, 10(2), 20-35. <https://doi.org/10.5430/jha.v10n2p20/>
3. Antsiferov, A., & Svidlov, A. (2021). Analysis of interoperability issues between BIM software and game engines. *Journal of Physics: Conference Series*, 2032, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2032/1/012004/>
4. Shaker, N., Togelius, J., Nelson, & M.J. (2018). *Procedural content generation in games: Computational synthesis and creative systems*. Springer.
5. Hendrikx, M., Meijer, S., Van Der Velden, J., & Iosup, A. (2019). Procedural content generation for games: A survey. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, 15(1s), 1-34. <https://doi.org/10.1145/3293318/>
6. Kolarevic, B. (2018). Computing the non-computable: Parametric design in architecture. *International Journal of Architectural Computing*, 16(4), 313-324. <https://doi.org/10.1177/1478077118800982/>
7. Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, and contractors* (3rd ed.). Wiley.
8. Chen, Y., Wang, Y., & Liu, J. (2023). A review of real-time rendering technologies for architectural visualization in game engines. *Journal of Building Engineering*, 65, 105688. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105688/>
9. Kelly, G., & McCabe, H. (2018). Constraint-based procedural generation: A review and future directions. *International Conference on the Foundations of Digital Games*. (p. 1-10). <https://doi.org/10.1145/3235765.3235819>.

10. Merrell, P., Schkufza, E., Koltun, V. (2019). Constraint-based procedural generation of interior layouts. *ACM Transactions on Graphics*, 38(4), 1-12. <https://doi.org/10.1145/3306346.3323023>.

11. Tuteneel, T., Bidarra, R., Smelik, R.M., & de Kraker, K.J. (2020). Automating the generation of virtual building interiors: A survey and comparative review. *ACM Transactions on Graphics*, 39(6), 1-25. <https://doi.org/10.1145/3414685.3417873//>

12. Gijp, G.H., van der Schaaf, M.F., van der Vleuten, C.P.M., Verwijnen, G.M., & Boshuizen, H.P.A. (2018). Trends in medical simulation: A review of the literature. *Surgical Endoscopy*, 32(1), 21-32. <https://doi.org/10.1007/s00464-017-5634-9/>

13. Ganni, S., Al-Ghamdi, M.S., Al-Hussain, R., Ahmed, M.A., & Khalid, K. (2024). Virtual reality in medical simulation: A review of current technologies and future trends. *Journal of Medical Systems*, 48(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10916-023-02012-8>.

14. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2022). Заклади охорони здоров'я. Основні положення (ДБН В.2.2-10:2022). <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1838>.

15. Міністерство охорони здоров'я України. (2021). Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Санітарно-протиепідемічні вимоги до закладів охорони здоров'я, що надають амбулаторну та стаціонарну медичну допомогу» (Наказ № 1614). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1315-21>.

16. Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». (2019). Чисті приміщення та пов'язані з ними контрольовані середовища. Частина 1. Класифікація чистоти повітря за концентрацією частинок (ДСТУ EN ISO 14644-1:2019). ДП "УкрНДНЦ".

17. Державне підприємство «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості». (2021). Світло та освітлення. Освітлення робочих місць. Частина 1. Внутрішні робочі місця (ДСТУ EN 12464-1:2021). ДП "УкрНДНЦ".