

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій,
обліку та фінансів

Кафедра комп'ютерних технологій
і моделювання систем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ПРИХОДЬКО Ярослав Анатолійович

УДК 004.9

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

VR - СИСТЕМА ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ ТА ВЕТЕРАНІВ

(тема роботи)

126 "Інформаційні системи та технології"

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

ПРИХОДЬКО Ярослав Анатолійович

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Тимонін Ю. О. -

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних
технологій моделювання систем

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

Висновок кафедри _____
за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри _____
№ _____ від «_____» _____ 20____ р.

Завідувач кафедри _____

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ім'я, по батькові)
«_____» _____ 20____ р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Приходько Ярослав Анатолійович захистив
(прізвище, ім'я, по батькові)
кваліфікаційну роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____
за шкалою ECTS _____
за національною шкалою _____

Секретар ЕК _____

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ім'я, по батькові)

АНОТАЦІЯ

Приходько Я.А. VR - система для реабілітації військових та ветеранів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису. 40 с., 5 рис., 27 джерел, 2 додатків.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 126 – Інформаційні системи та технології. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Робота присвячена розробці VR-системи для реабілітації військових та ветеранів, що зазнали фізичних травм. Розглянуто актуальність проблеми, проаналізовано сучасні VR-технології та існуючі рішення для реабілітації. Описано процес проектування, розробки та тестування VR-системи. Дослідження включає аналіз літературних джерел, моделювання та тестування. Результати роботи можуть бути використані для відновлення фізичних функцій, психологічної підтримки та соціальної адаптації військових та ветеранів. Робота складається з трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Ключові слова: VR-система, реабілітація, військові, ветерани, фізичні травми, верхні кінцівки, віртуальна реальність, технології.

SUMMARY

Prykhodko Y.A. VR - a system for rehabilitation of military and veterans. 40 p., 5 figures, 27 sources, 2 appendices.

Qualification work for the bachelor's degree in specialty 126 - Information systems and technologies - Polissya National University, Zhytomyr, 2025.

The work is devoted to the development of a VR system for the rehabilitation of military and veterans who have suffered physical injuries. The urgency of the problem is considered, modern VR technologies and existing solutions for rehabilitation are analyzed. The process of designing, developing, and testing a VR system is described. The research includes literature analysis, modeling, and testing. The results of the work can be used to restore physical functions, psychological support, and social adaptation of military personnel and veterans. The paper consists of three chapters, conclusions, references and appendices.

Keywords: VR system, rehabilitation, military, veterans, physical injuries, upper limbs, virtual reality, technology.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ VR-СИСТЕМ ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ.....	7
1.1 Огляд сучасних VR-технологій.....	7
1.2 Психологічні та фізіотерапевтичні аспекти реабілітації військових.....	9
1.3 Існуючі VR-рішення для реабілітації.....	11
Висновки до розділу 1.....	13
2 РОЗРОБКА VR-СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ ТА ВЕТЕРАНІВ.....	14
2.1 Проектування VR-системи.....	14
2.2 Архітектурні та функціональні аспекти VR-системи.....	17
2.3 Розробка основних модулів VR-системи.....	24
Висновки до розділу 2.....	28
3 ТЕСТУВАННЯ VR-СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ.....	29
3.1 Тестування VR-системи.....	29
3.2 Опис інсталяції та вимог до обладнання VR-системи.....	32
3.2 Перспективи розвитку та вдосконалення VR-системи.....	35
Висновки до розділу 3.....	37
ВИСНОВКИ.....	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	41
ДОДАТКИ.....	44

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

VR – віртуальна реальність

ПТСР – посттравматичний стресовий розлад

ПЗ – програмне забезпечення

ОС – операційна система

ПК – персональний комп'ютер

ППП – пакети прикладних програм

ВСТУП

Реабілітація військових, які зазнали травм під час бойових дій, є важливою медико-соціальною проблемою. Посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) та фізичні травми, зокрема внаслідок війни в Україні, є поширеними проблемами серед військовослужбовців. Сучасні VR-технології відкривають нові можливості для ефективної реабілітації, забезпечуючи безпечне середовище для відновлення фізичних та психологічних функцій.

Метою роботи є розробка VR-системи для реабілітації військових та ветеранів з акцентом на відновлення після фізичних травм верхніх кінцівок.

Завдання роботи включають:

- 1) Аналіз сучасних VR-технологій та існуючих VR-рішень для реабілітації.
- 2) Проектування та розробку VR-системи з урахуванням функціональних та нефункціональних вимог.
- 3) Реалізація основних модулів VR-системи, включаючи графічний модуль, фізичний рушій та інтерактивний модуль.
- 4) Тестування VR-системи та оцінка її продуктивності.
- 5) Розробка рекомендацій щодо подальшого вдосконалення та впровадження системи.

Об'єкт дослідження – процес реабілітації військових і ветеранів з використанням VR-технологій.

Предмет дослідження – методи та програмні засоби для реалізації VR-системи.

У процесі дослідження застосовувалися наступні *методи*: аналіз літературних джерел, системний аналіз, моделювання та тестування.

Теоретичне значення роботи полягає в поглибленні розуміння процесів реабілітації військових за допомогою VR-технологій. Дослідження сприяє розширенню знань про ефективність застосування віртуальної реальності для відновлення фізичних функцій, а також про особливості розробки та впровадження VR-систем у медичну практику.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості

використання розробленої VR-системи для реабілітації військових та ветеранів, сприяючи відновленню їхніх фізичних функцій, психологічної підтримки та соціальної адаптації.

Результати роботи апробовано на 2 всеукраїнських науково-практичних конференціях та опубліковано 2 тези у збірниках наукових праць. Робота складається з трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РОЗРОБКИ VR-СИСТЕМ ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ

1.1 Огляд сучасних VR-технологій

Віртуальна реальність (VR) визначається як штучне середовище, створене за допомогою комп'ютерних технологій, яке забезпечує користувачу візуальні, звукові та тактильні ефекти, що імітують реальність [11;19]. Основною метою VR є створення ілюзії присутності в альтернативному світі, де користувач може взаємодіяти з об'єктами та середовищем у режимі реального часу. Принцип роботи VR базується на використанні спеціального обладнання, яке дозволяє відстежувати рухи користувача та адаптувати віртуальне середовище відповідно до цих рухів. Це досягається за рахунок застосування трекінгових систем, які фіксують положення голови, рук та інших частин тіла [12; 20].

Системи VR можуть бути класифіковані на кілька типів: повне занурення, часткове занурення та не занурювальні системи. Повне занурення забезпечує максимальний рівень інтерактивності та реалізму, використовуючи високопродуктивні комп'ютери та спеціалізоване обладнання [20]. Часткове занурення може включати елементи віртуальної реальності в реальному світі, тоді як не занурювальні системи зазвичай обмежуються простими 2D-візуалізаціями.

Для реалізації віртуальної реальності використовуються різноманітні технічні засоби, зокрема:

Шоломи VR – це основний елемент для занурення у віртуальний світ. Шоломи оснащені дисплеями для кожного ока, що забезпечує стереоскопічний ефект. Вони також містять датчики для відстеження рухів голови, що дозволяє змінювати перспективу зображення відповідно до положення користувача [11;12].

Контролери – ці пристрої дозволяють користувачу взаємодіяти з віртуальним середовищем. Контролери можуть мати різні форми і функції, включаючи кнопки, сенсори руху та тактильний зворотний зв'язок [10;19].

Датчики руху – вони використовуються для відстеження положення тіла користувача у просторі. Це можуть бути як зовнішні датчики, які фіксують рухи

за допомогою камер або лазерних променів, так і вбудовані датчики у шоломах або контролерах [10;20].

Ці технології разом створюють комплексну систему, яка забезпечує користувачу відчуття присутності у віртуальному світі.

Розробка VR-додатків здійснюється на основі потужних платформ, які надають інструменти для створення інтерактивних середовищ. Дві найпопулярніші платформи:

Unity – це одна з найвідоміших платформ для розробки ігор та VR-додатків. *Unity* підтримує широкий спектр пристроїв і має потужний набір інструментів для створення 3D-графіки та анімації. Завдяки своїй простоті у використанні та великій спільноті розробників, *Unity* є популярним вибором для новачків і професіоналів [7;10].

Unreal Engine – ця платформа пропонує ще більш високий рівень графічної якості завдяки потужному рендерингу. *Unreal Engine* часто використовується для створення AAA-ігор і складних VR-досвідів. Вона також має інтегровану систему програмування на основі візуальних скриптів, що спрощує процес розробки [10;18].

Обидві платформи підтримують різноманітні формати контенту і забезпечують можливість інтеграції з іншими технологіями, такими як штучний інтелект і доповнена реальність.

Окрім *Unity* та *Unreal Engine*, існують й інші платформи для розробки VR-додатків, такі як *A-Frame* (для веб-розробки) та *CryEngine* (для створення ігор) [6]. Кожна з цих платформ має свої особливості й переваги, що дозволяє розробникам вибирати найбільш підходящий інструмент залежно від специфіки проекту.

Таким чином, сучасні VR-технології відкривають нові горизонти для інтерактивного навчання, розваг та терапії. Завдяки постійному розвитку апаратного забезпечення і програмного забезпечення, віртуальна реальність стає дедалі доступнішою і ефективнішою у різних сферах діяльності. Важливими аспектами цього процесу є не лише технічні інновації, але й культурні зміни, які супроводжують впровадження VR у повсякденне життя людини.

1.2 Психологічні та фізіотерапевтичні аспекти реабілітації військових

Реабілітація військових, які зазнали травм під час бойових дій, є складним і багатогранним процесом, що включає як психологічні, так і фізіотерапевтичні аспекти. В умовах сучасних конфліктів, таких як війна в Україні, посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) та фізичні травми стали поширеними проблемами серед військовослужбовців [15]. Ця робота розгляне основні психологічні травми, фізіологічні аспекти реабілітації після поранень та використання віртуальної реальності (VR) у медичній та психологічній реабілітації.

Посттравматичний стресовий розлад є серйозним психічним станом, який виникає внаслідок переживання травматичних подій, зокрема бойових дій. За даними досліджень, симптоми ПТСР розвиваються у 12-20% військовослужбовців, які зазнали бойової травми і не звернулися за психологічною допомогою [3;8]. Основними симптомами цього розладу є регулярні спогади про травмуючу подію (флешбеки), гіперзбудження, проблеми зі сном, емоційна відстороненість та надмірна настороженість [3;15].

Тривалість перебування військових у зоні бойових дій прямо пов'язана з ризиком розвитку ПТСР. Зокрема, молоді військовослужбовці віком 18-24 років мають підвищений ризик виникнення симптомів депресії та тривоги [8;14]. Важливо зазначити, що ПТСР може проявлятися не лише через психологічні симптоми, але й супроводжуватися фізичними порушеннями, такими як головний біль або проблеми з шлунково-кишковим трактом [13;15].

Фізіологічні аспекти реабілітації після поранень

Фізіотерапія є ключовим елементом реабілітації військових після отриманих поранень. Вона включає в себе різноманітні методи відновлення функцій організму, які можуть бути порушені внаслідок травм. Основними цілями фізіотерапії є відновлення рухливості, зміцнення м'язів і покращення загального фізичного стану пацієнтів.

Процес фізіотерапії може включати:

Розробку індивідуальних програм тренувань: Фахівці створюють програми, що враховують специфіку отриманих травм та загальний стан здоров'я пацієнта.

Використання сучасних технологій: Сучасні методи лікування можуть включати електростимуляцію м'язів, ультразвукову терапію та інші технології для полегшення болю і відновлення функцій.

Групові заняття: Це можуть бути заняття в групах для покращення соціальної адаптації та підтримки морального духу пацієнтів.

Фізична реабілітація має важливе значення не лише для відновлення фізичних функцій, але й для покращення психологічного стану військових. Відомо, що активність і рух позитивно впливають на настрій і знижують рівень тривог.

Використання VR у медичній та психологічній реабілітації

Віртуальна реальність (VR) стає все більш популярною технологією у медичній та психологічній реабілітації. Вона дозволяє створювати безпечне середовище для пацієнтів, де вони можуть працювати над своїми страхами та переживаннями без ризику повторного травмування.

Розглянемо переваги використання VR у реабілітації.

Імерсивність – VR дозволяє пацієнтам зануритися в симульоване середовище, що може допомогти їм працювати над своїми емоціями та реакціями на стресові ситуації.

Контрольоване середовище – лікарі можуть контролювати рівень стресу пацієнтів під час терапії і адаптувати сценарії відповідно до їхніх потреб.

Поліпшення мотивації – використання VR-технологій робить процес реабілітації більш захоплюючим і мотивуючим для пацієнтів.

Дослідження показали, що використання VR у терапії ПТСР може зменшити симптоми тривоги та депресії на 30-40% [12;15]. Це свідчить про те, що VR-технології можуть стати важливим інструментом у комплексному підході до реабілітації військових.

Реабілітація військових після бойових дій є складним процесом, що вимагає інтеграції психологічних і фізіотерапевтичних аспектів [9]. Посттравматичний

стресовий розлад є серйозною проблемою для багатьох військовослужбовців, а фізіотерапія грає ключову роль у відновленні їхнього фізичного стану. Використання новітніх технологій, таких як VR, відкриває нові можливості для ефективної медичної та психологічної реабілітації. Важливо продовжувати досліджувати ці підходи для покращення якості життя військових і ветеранів.

1.3 Існуючі VR-рішення для реабілітації

Віртуальна реальність (VR) стала важливим інструментом у медичній реабілітації, пропонуючи нові можливості для лікування пацієнтів з різними травмами та захворюваннями. Серед основних програм, що використовуються в цій сфері, можна виділити такі:

Virtual Reality Rehabilitation System (VRRS) – ця система дозволяє пацієнтам виконувати різноманітні фізичні вправи у віртуальному середовищі, що стимулює їх активність і мотивацію. Дослідження показали, що пацієнти, які використовували VRRS, демонстрували покращення в моторних навичках та загальному фізичному стані [21].

Motive – ця програма спеціалізується на реабілітації пацієнтів після травм опорно-рухового апарату. Вона включає інтерактивні ігри та завдання, які дозволяють пацієнтам працювати над своїми руховими функціями в ігровій формі, що підвищує їхню мотивацію [17].

Rehabilitation Gaming System (RGS) – це рішення поєднує VR-технології з ігровими елементами, що робить процес реабілітації більш захоплюючим. Пацієнти можуть виконувати завдання, які допомагають їм відновлювати рухові навички, при цьому отримуючи позитивні емоції від гри [3].

VR Pain Management – програми, спрямовані на зменшення болю через занурення у віртуальні світи. Дослідження показують, що такі системи можуть значно знижувати інтенсивність болю у пацієнтів, особливо під час післяопераційного періоду [4].

Порівняння переваг і недоліків різних систем

Переваги VR-рішень:

Індивідуалізація терапії – VR-програми можуть бути адаптовані до конкретних потреб пацієнта, враховуючи його фізичні можливості та характер травми¹.

Покращення мотивації – віртуальні середовища та ігрові елементи роблять процес реабілітації більш цікавим і залучаючим для пацієнтів [2; 3].

Зменшення болю – використання VR може знижувати рівень болю завдяки емоційній залученості пацієнтів у віртуальний світ [4].

Недоліки VR-рішень:

Висока вартість – апаратне та програмне забезпечення для VR може бути дорогим, що обмежує доступність таких рішень для багатьох медичних закладів [4].

Обмежена кількість програм – хоча кількість VR-додатків зростає, досі існує недостатня кількість спеціалізованих програм для реабілітації [1].

Необхідність супроводу спеціаліста – для ефективного використання VR-терапії потрібен кваліфікований медичний працівник, що може ускладнити процес лікування [2].

Перспективи використання VR для військових та ветеранів

Використання VR-технологій у реабілітації військових та ветеранів має значний потенціал. Багато військових зазнають серйозних травм під час служби, і традиційні методи реабілітації не завжди є достатньо ефективними. VR може стати важливим інструментом для поліпшення їхнього відновлення.

Психологічна підтримка – військові часто стикаються з посттравматичним стресовим розладом (ПТСР). Використання VR може допомогти їм відновити контроль над своїми емоціями та зменшити страхи через безпечне занурення у віртуальні сценарії [1].

Фізична реабілітація – програми, які фокусуються на відновленні рухових функцій після травм або ампутацій, можуть суттєво покращити фізичний стан ветеранів. Інтерактивні вправи у VR дозволяють їм тренуватися в умовах, близьких до реальних [5].

Соціальна інтеграція – використання VR може сприяти соціалізації ветеранів через спільні ігри або тренування з іншими пацієнтами, що важливо для їхнього психологічного відновлення [4].

Віртуальна реальність відкриває нові горизонти для медичної реабілітації, пропонуючи інноваційні рішення для покращення якості життя пацієнтів. Хоча існують певні недоліки та виклики у впровадженні цих технологій, їх потенціал у лікуванні військових та ветеранів є значним. Подальші дослідження та розвиток спеціалізованих програм можуть зробити VR ще більш ефективним інструментом у медицині.

Висновки до розділу 1

У першому розділі роботи було розглянуто теоретичні аспекти розробки VR-систем для реабілітації. Аналіз сучасних VR-технологій показав, що вони відкривають широкі можливості для створення інтерактивних середовищ, які можуть бути використані для відновлення фізичних та психологічних функцій військовослужбовців.

Дослідження психологічних та фізіотерапевтичних аспектів реабілітації військових виявило, що посттравматичний стресовий розлад (ПТСР) та фізичні травми є поширеними проблемами, які вимагають комплексного підходу до лікування. Використання VR-технологій у реабілітації дозволяє створити безпечне та контрольоване середовище, де пацієнти можуть працювати над своїми страхами та переживаннями, а також відновлювати рухові функції.

Огляд існуючих VR-рішень для реабілітації показав, що вони мають значний потенціал для покращення якості життя пацієнтів. Однак, існують певні недоліки, такі як висока вартість обладнання та необхідність супроводу спеціаліста, які обмежують доступність цих технологій.

2 РОЗРОБКА VR-СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ ТА ВЕТЕРАНІВ

2.1 Проектування VR-системи

Розробка системи реабілітації військовослужбовців є складним процесом, що вимагає врахування як функціональних, так і нефункціональних вимог. Вибір платформи та інструментів розробки, таких як Unity, а також створення сценаріїв реабілітаційних програм, є ключовими етапами цього процесу.

Опишемо вимоги до системи для реабілітації військових.

Функціональні вимоги визначають, що система повинна робити:

Модулі фізичної реабілітації – система повинна надавати інтерактивні вправи для відновлення рухових функцій. Це можуть бути віртуальні тренажери або симуляції, які допомагають пацієнтам виконувати необхідні рухи.

Психологічна підтримка – інтеграція модулів для зниження стресу та тривожності, таких як медитації або релаксаційні техніки, що можуть бути представлені у вигляді віртуальних середовищ.

Моніторинг прогресу – система повинна відстежувати та записувати дані про виконання вправ пацієнтом, надаючи зворотний зв'язок як пацієнту, так і медичному персоналу.

Персоналізація – можливість налаштування програм реабілітації відповідно до індивідуальних потреб пацієнта, враховуючи тип поранення, рівень фізичної підготовки та психологічний стан.

Дистанційний доступ – забезпечення можливості використання системи як у реабілітаційних центрах, так і вдома, що особливо важливо для пацієнтів з обмеженою мобільністю.

Нефункціональні вимоги визначають, як система повинна виконувати свої функції.

Наша система має мати інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який не потребує тривалого навчання для пацієнтів та медичного персоналу; бути стійкою до збоїв та забезпечувати безперервну роботу без втрати даних.

Обов'язковою умовою її розробки є захист персональних даних пацієнтів відповідно до стандартів конфіденційності та безпеки інформації. І можливість розширення функціоналу та підтримки більшої кількості користувачів без значних змін у архітектурі системи.

Підтримка різних апаратних платформ та операційних систем для забезпечення широкого доступу до системи.

Оскільки, Unity є потужною платформою для розробки інтерактивних 3D-додатків і широко використовується у сфері медичних симуляцій та реабілітації. А також, підтримує розробку додатків для різних платформ, включаючи Windows, macOS, iOS, Android та інші, що дозволяє забезпечити доступ до системи на різних пристроях. Саме тому для практичної реалізації системи реабілітації військовослужбовців обираємо її.

Unity надає можливість створення віртуальних та доповнених реальностей, що можуть бути використані для створення реалістичних реабілітаційних сценаріїв. Володіє широким спектром інструментів для створення інтерактивних середовищ, фізичних симуляцій та анімацій.

Велика спільнота розробників та наявність численних ресурсів, таких як бібліотеки, плагіни та навчальні матеріали, спрощують процес розробки та вирішення можливих проблем.

Використання Unity для розробки реабілітаційних програм дозволяє створювати інтерактивні та адаптивні рішення, які можуть бути ефективно застосовані у клінічних умовах, а також для дистанційної реабілітації військовослужбовців.

Нижче наведемо основні напрямки розробки реабілітаційних сценаріїв, що забезпечать персоналізований підхід та ефективне відновлення пацієнтів.

Фізична реабілітація за допомогою VR та інтерактивних вправ

Фізична реабілітація після травм та операцій потребує постійного тренування м'язів та координації рухів. Використання Unity у VR-середовищах дозволяє створювати інтерактивні вправи, які імітують реальні рухи та дозволяють пацієнтам виконувати їх у безпечному цифровому просторі.

Приклади VR-вправ для фізичної реабілітації:

1. Вправи на відновлення координації: віртуальні сценарії, де користувач має нахилитися, піднімати предмети або долати перешкоди.
2. Тренування дрібної моторики: симуляція малювання, написання тексту чи маніпулювання об'єктами для відновлення функцій пальців та кистей.
3. Баланс та орієнтація в просторі: віртуальні тренажери для відновлення роботи вестибулярного апарату.

Гейміфікація для підвищення мотивації

Щоб зробити процес реабілітації цікавим та ефективним, можна впровадити механізми гейміфікації, які забезпечать додаткову мотивацію для користувачів.

Елементи гейміфікації у реабілітації:

1. Досягнення та рівні: система нараховує бали за виконані вправи, що стимулює користувача продовжувати тренування.
2. Персоналізовані аватари: можливість створити власного персонажа та взаємодіяти з віртуальним світом.
3. Сюжетна лінія: виконання реабілітаційних завдань як частина цікавої історії.

Дистанційний контроль лікарів та інтеграція з медичними базами

Система реабілітації може бути інтегрована з медичними базами даних, що дозволяє лікарям дистанційно відстежувати прогрес пацієнтів та вносити корективи у лікувальні плани.

Можливості для медичного персоналу:

1. Віддалений моніторинг: лікарі отримують звіти про прогрес пацієнтів та можуть коригувати програми.
2. Відеозв'язок та консультації: можливість проведення онлайн-консультацій з лікарем або терапевтом.
3. Інтеграція з носимими пристроями: використання датчиків для збору фізіологічних показників (частота серцевих скорочень, рівень стресу тощо).

Розробка системи реабілітації військовослужбовців з використанням Unity

відкриває широкі можливості для фізичного та психологічного відновлення. Інтерактивні технології, VR/AR, машинне навчання та гейміфікація дозволяють створити гнучку та персоналізовану систему, яка може використовуватися як у клінічних умовах, так і для дистанційної реабілітації.

Впровадження цієї системи може значно покращити якість життя та відновлення військових, які потребують як фізичної, так і психологічної реабілітації після бойових дій.

2.2 Архітектурні та функціональні аспекти VR-системи

Розробка VR-системи "Тенісний корт" для реабілітації військовослужбовців вимагає комплексного підходу, що поєднує в собі глибоке розуміння архітектурних принципів побудови віртуальних середовищ, функціональних особливостей інтерактивних систем та специфіки реабілітаційного процесу

На рис. 2.1. представлена діаграма класів, що відображає статичну структуру системи, яка моделює тенісний корт у віртуальній реальності. Вона складається з двох основних блоків, що демонструють різні аспекти системи: модель предметної області (верхня частина діаграми) та архітектурні компоненти (нижня частина діаграми).

Перший блок, що моделює предметну область, відображає ієрархію класів, пов'язаних з користувачами системи. Базовим класом є Person, що містить загальні атрибути, такі як Name, Phone Number, Email Address, та метод Purchase Parking Pass. Клас Person має зв'язок 0..1 з класом Address, що вказує на те, що особа може мати або не мати адресу, представлену атрибутами Street, City, State, Postal Code та Country. Класи Student та Professor успадковують властивості класу Person та додають специфічні атрибути та методи. Зокрема, Student має атрибути Student Number, Average Mark та методи Is Eligible To Enroll та Get Seminars Taken, а Professor має атрибут Salary.

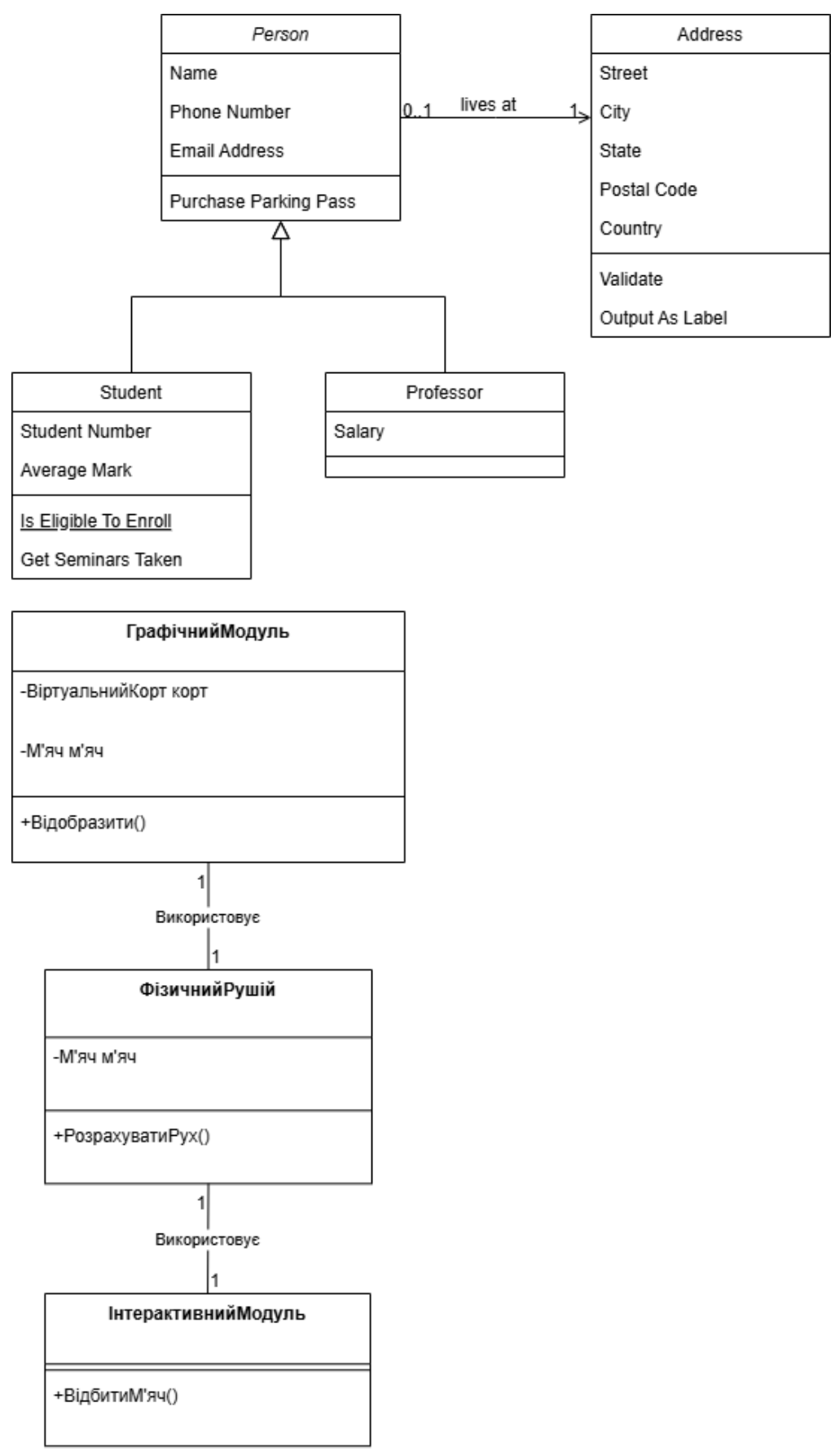


Рис.2.1. Діаграма класів

Другий блок діаграми представляє архітектурні компоненти VR-системи.

Клас ГрафічнийМодуль відповідає за візуалізацію віртуального корту та м'яча, маючи атрибути ВіртуальнийКорт корт та М'яч м'яч, а також метод Відобразити(). Клас ФізичнийРушій моделює фізичну поведінку м'яча, маючи атрибут М'яч м'яч та метод РозрахуватиРух(). Клас ІнтерактивнийМодуль забезпечує взаємодію користувача з м'ячем, маючи метод ВідбитиМ'яч(). Між класами ГрафічнийМодуль та ФізичнийРушій, а також між ФізичнийРушій та ІнтерактивнийМодуль існують асоціації "Використовує", що вказують на залежність між цими компонентами.

Таким чином, діаграма класів надає чітке уявлення про статичну структуру системи, відображаючи класи, їх атрибути, методи та відносини між ними, що дозволяє зрозуміти загальну архітектуру та функціональність VR-системи "Тенісний корт".

На рис. 2.2 представлена діаграма послідовностей, що демонструє динамічну взаємодію між компонентами VR-системи "Тенісний корт", зосереджуючись на процесі відбивання м'яча користувачем. Діаграма відображає послідовність повідомлень та дій, що відбуваються в часі, від моменту руху контролера користувачем до візуалізації результату на екрані.

Процес розпочинається з того, що *Користувач* здійснює рух контролером, який реєструється *Системою управління введенням*. Ця система інтерпретує рух контролера та передає відповідні *Дані руху* до *Інтерактивного модуля*. Отримавши дані руху, *Інтерактивний модуль* обробляє їх та визначає вплив на м'яч, посилаючи відповідне повідомлення до *Фізичного рушія*.

Фізичний рушій, у свою чергу, обчислює нову траєкторію м'яча з урахуванням отриманого впливу, а також фізичних законів, таких як гравітація, опір повітря та ефект Магнуса. Після розрахунку Фізичний рушій передає оновлені Дані позиції м'яча до Графічного модуля.

Графічний модуль використовує отримані дані для оновлення візуалізації м'яча на віртуальному корті. Нарешті, Графічний модуль передає Відображення змін до Користувача, який бачить результат своїх дій на екрані VR-гарнітури.

Таким чином, діаграма послідовностей демонструє чітку послідовність дій

та взаємодію між компонентами системи, підкреслюючи роль кожного компонента у процесі відбивання м'яча та забезпечуючи розуміння динаміки роботи VR-системи "Тенісний корт".

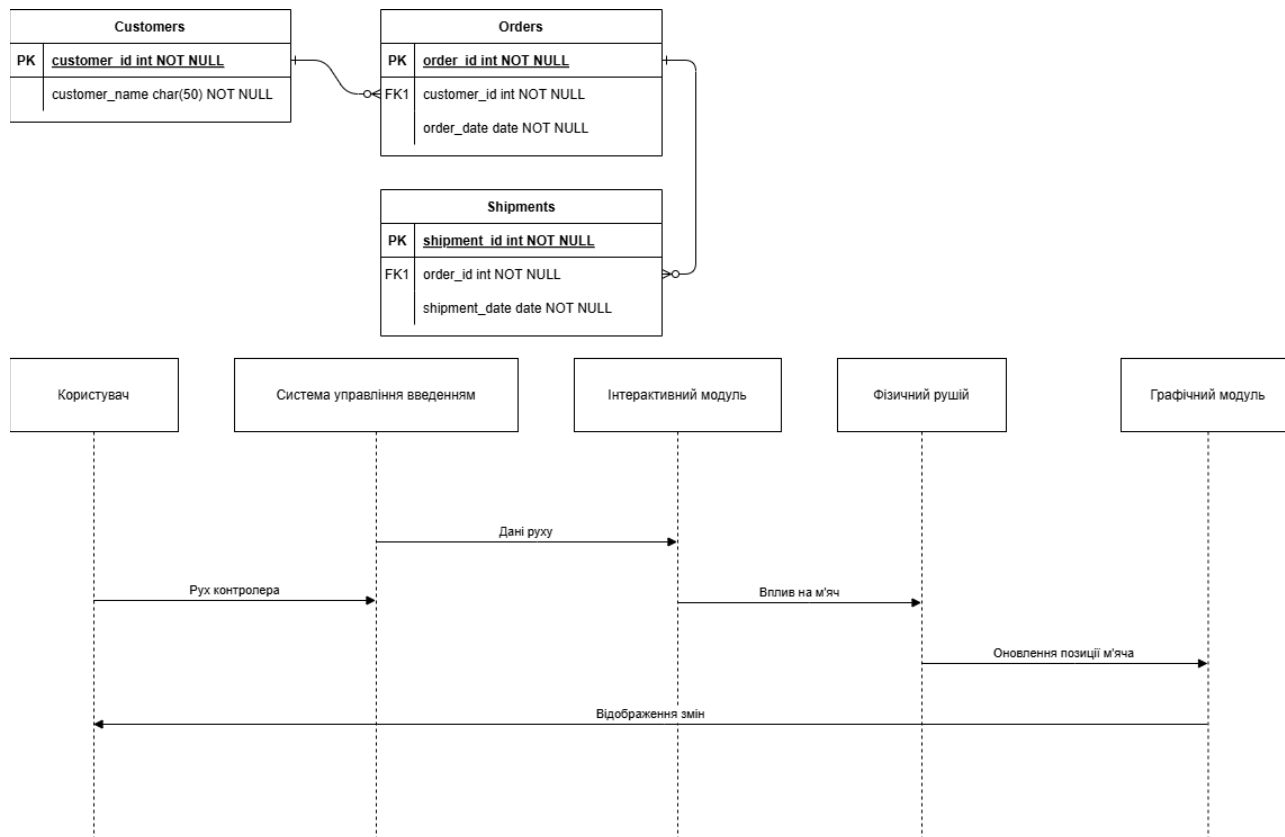


Рис.2.2. Діаграма послідовностей

Для сприяння відновленню фізичних та психологічних функцій у військових, які втратили верхню кінцівку, було розроблено та інтегровано у VR-систему "Тенісний корт" набір спеціалізованих інтерактивних елементів. Ці елементи спрямовані на відновлення моторики, координації та психоемоційного стану, що є критично важливим для успішної реабілітації.

Тренувальний режим адаптовано для військових, що використовують протези верхніх кінцівок. Він дозволяє виконувати подачі та удари з різною силою та кутами, сприяючи розвитку навичок використання протеза в умовах, максимально наближених до реальних. Військові можуть відпрацьовувати точні рухи, необхідні для виконання специфічних завдань, що сприяє відновленню втрачених функцій та покращенню якості життя.

Система тестування навичок відіграє ключову роль у моніторингу прогресу

реабілітації. Вона оцінює точність та силу ударів, виводячи статистику ефективності використання протеза. Це дозволяє військовим та реабілітологам відстежувати динаміку відновлення, коригувати програму реабілітації та встановлювати досяжні цілі. Візуалізація результатів у вигляді графіків та діаграм забезпечує наочність процесу та мотивує до подальших тренувань.

Режим вільної гри створює імерсивне середовище, де військові можуть взаємодіяти з м'ячем у реалістичних умовах гри без обмежень. Цей режим сприяє розвитку психоемоційної стійкості, зменшенню стресу та покращенню настрою. Військові можуть відчувати себе активними учасниками гри, що сприяє відновленню впевненості у власних силах та поверненню до активного життя.

Таким чином, VR-система "Тенісний корт" з адаптованими інтерактивними елементами є ефективним інструментом для реабілітації військових з втратою верхньої кінцівки. Вона сприятиме відновленню фізичних функцій, розвитку моторики та координації, а також покращенню психоемоційного стану, що є важливим кроком на шляху до повноцінного повернення до життя.

На рис. 2.3. представлена діаграма компонентів, що моделює взаємодію користувача з віртуальним середовищем, ймовірно, в контексті віртуальної реальності або інтерактивного симулятора. Діаграма складається з п'яти основних компонентів, розташованих вертикально та з'єднаних стрілками, що вказують на послідовність взаємодії між ними.

Верхній компонент, позначений як "Користувач", є відправною точкою процесу. Він представляє зовнішню сутність, яка ініціює взаємодію з системою. З "Користувача" виходить стрілка, спрямована вниз до компонента "Система управління введенням", що вказує на те, що користувач надсилає вхідні дані або команди до цієї системи.

Компонент "Система управління введенням" відповідає за обробку та інтерпретацію вхідних даних, отриманих від користувача. Він може включати в себе датчики, контролери або інші пристрої, що зчитують рухи або команди користувача. З "Системи управління введенням" виходить стрілка, спрямована вниз до компонента "Інтерактивний модуль", що свідчить про передачу

оброблених даних до цього модуля.



Рис.2.3. Діаграма компонентів

"Інтерактивний модуль" є центральним компонентом системи, який відповідає за обробку та реагування на вхідні дані. Він може включати в себе логіку гри, фізичні симуляції або інші алгоритми, що визначають поведінку віртуального середовища. З "Інтерактивного модуля" виходить стрілка, спрямована вниз до компонента "Фізичний рушій", що вказує на передачу даних або команд до цього модуля.

"Фізичний рушій" відповідає за моделювання фізичної поведінки об'єктів у віртуальному середовищі. Він може включати в себе алгоритми для розрахунку руху, зіткнень або інших фізичних явищ. З "Фізичного рушія" виходить стрілка, спрямована вниз до компонента "Графічний модуль", що свідчить про передачу даних про стан віртуального середовища до цього модуля.

"Графічний модуль" відповідає за візуалізацію віртуального середовища на

екрані або в VR-гарнітурі. Він використовує дані, отримані від "Фізичного рушія", для створення зображень або анімацій, які відображаються користувачеві. З "Графічного модуля" виходить стрілка, спрямована вгору до компонента "Користувач", що вказує на те, що користувач отримує візуальний зворотний зв'язок від системи.

Для забезпечення максимальної реалістичності та точності моделювання рухів, а також для ефективного моніторингу процесу реабілітації військових з втратою верхньої кінцівки, у VR-систему "Тенісний корт" було інтегровано комплекс високотехнологічних пристроїв.

Контролери VR використовуються для імітації рухів ракетки, що дозволяє військовим відпрацьовувати удари по м'ячу в умовах, максимально наближених до реальних. Ергономічний дизайн контролерів забезпечує комфортне використання та точну передачу рухів користувача у віртуальний простір.

Система відстеження руху (Motion Tracking) забезпечує аналіз рухів гравця в реальному часі, що дозволяє створювати природну взаємодію з віртуальним середовищем. Висока точність відстеження рухів дозволяє детально аналізувати техніку ударів, коригувати рухи та підвищувати ефективність реабілітаційних вправ.

Для моніторингу навантаження на суглоби та аналізу фізичних параметрів руху використовуються фізіотерапевтичні датчики. Ці датчики дозволяють відстежувати силу ударів, амплітуду рухів, швидкість реакції та інші важливі показники. Отримані дані використовуються для індивідуалізації програми реабілітації та запобігання перевантаженням.

Для створення ефекту присутності та підвищення мотивації до тренувань у системі реалізовано генерацію зворотного зв'язку. Користувач отримує тактильний відгук при контакті м'яча з ракеткою, що створює відчуття реального удару. Регульована інтенсивність зворотного зв'язку дозволяє адаптувати систему до індивідуальних потреб користувача.

Таким чином, інтеграція контролерів VR, системи відстеження руху, фізіотерапевтичних датчиків та генерації зворотного зв'язку забезпечує

комплексний та ефективний підхід до реабілітації військових з втратою верхньої кінцівки. Висока точність моделювання, детальний аналіз рухів та індивідуалізація програми реабілітації сприяють швидкому та якісному відновленню фізичних функцій.

2.3 Розробка основних модулів VR-системи

У межах магістерської роботи було здійснено проектування та реалізацію VR-системи "Тенісний корт" у середовищі Unity. Основною метою роботи було створення інтерактивної моделі тенісного корту з реалістичною фізикою руху м'яча та можливістю взаємодії користувача з віртуальним середовищем.

VR-технології забезпечують користувачу занурення у віртуальне середовище завдяки поєднанню графічних, звукових і тактильних ефектів. У спортивних симуляторах, зокрема для тенісу, важливими компонентами є: шоломи VR, які забезпечують стереоскопічний ефект та відстежують рухи голови; контролери, що імітують рухи ракетки та дозволяють взаємодіяти з м'ячем; фізична модель, яка визначає поведінку м'яча при відскоках, підкрутці та ударах.

При розробці VR-системи було досліджено фізичні характеристики тенісного м'яча: діаметр – 6,5 см; маса – 58 г; середня швидкість – до 200 км/год; коефіцієнт пружності змінюється залежно від типу покриття корту.

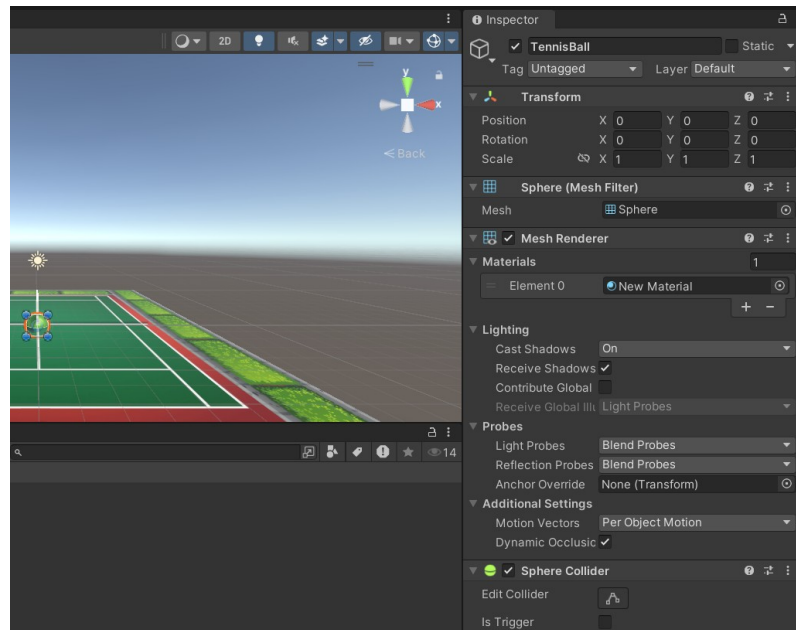


Рис.2.4. Характеристики м'яча

Рух м'яча визначався законами кінематики, зокрема рівняннями траєкторії та ефектом Магнуса, який впливає на поведінку м'яча при підкрутці.

Для обчислення траєкторії використано рівняння:

$$x(t) = x_0 + v_x t + \frac{1}{2} a_x t^2; \quad x(t) = x_{i_0} + v_{i_x} t + \frac{1}{2} a_{i_x} t^2;$$

$$y(t) = y_0 + v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2; \quad y(t) = y_{i_0} + v_{i_y} t + \frac{1}{2} a_{i_y} t^2;$$

$$z(t) = z_0 + v_z t + \frac{1}{2} a_z t^2; \quad z(t) = z_{i_0} + v_{i_z} t + \frac{1}{2} a_{i_z} t^2;$$

де:

x, y, z – координати м'яча у просторі;

$v_x, v_y, v_z, v_{i_x}, v_{i_y}, v_{i_z}$ – початкові компоненти швидкості;

$a_x, a_y, a_z, a_{i_x}, a_{i_y}, a_{i_z}$ – прискорення (гравітація, опір);

t – час руху.

Для більш реалістичної моделі врахували додаткові сили, що діють на м'яч: силу тяжіння, що діє вертикально вниз, додаючи прискорення до a_z (звичайне значення -9.81 м/с^2); силу опору повітря, що залежить від швидкості м'яча та його форми, спрямована проти руху; сила Магнуса, що виникає через обертання м'яча, впливає на траєкторію.

Ефект Магнуса виникає через різницю тисків повітря навколо обертового

м'яча. Це призводить до виникнення сили, перпендикулярної до напрямку руху та осі обертання. Для його врахування додали додаткові прискорення до рівнянь руху: a_{x_magnus} , a_{y_magnus} , a_{z_magnus} . Ці прискорення залежать від: швидкості обертання м'яча, напрямку обертання, швидкості руху м'яча, властивостей повітря.

Таким чином, повна математична модель руху м'яча виглядає так:

$$\begin{aligned}x(t) &= v_x t + \frac{1}{2} (a_x + a_{x_magnus}) t^2, \\y(t) &= v_y t + \frac{1}{2} (a_y + a_{y_magnus}) t^2, \\z(t) &= v_z t + \frac{1}{2} (a_z + a_{z_magnus} - g) t^2,\end{aligned}$$

де g - прискорення вільного падіння.

У моделі використовується текстура для візуалізації покриття корту, але фізика відскоку може бути налаштована для різних типів поверхонь: трав'яний корт – м'яч відскакує швидко, але низько, що робить гру динамічною та складною для захисту; ґрунтовий корт – відскок вищий і повільніший через більший коефіцієнт тертя, що дає більше часу на реакцію; хардкорт – баланс між швидкістю та висотою відскоку, забезпечуючи стабільну й передбачувану гру.

Ці характеристики можуть бути враховані у фізичних параметрах м'яча, таких як коефіцієнт пружності, сила тертя та гальмування при контакті з поверхнею (див. рис.2.5).

Саме тому, для візуалізації поверхні використали власну текстуру. З насупними налаштуваннями: додано текстуру покриття (завантажено в Unity та додано в папку Textures); вибрано матеріал (Material), до якого застосовано текстуру та встановлено призначення матеріалу – кортові; знайдено об'єкт TennisCourt у сцені; в Inspector у компоненті MeshRendererer замінено стандартний матеріал на новий з нашою текстурою; відрегульовано Tiling у Material для правильного масштабування текстури.

Ці дії дозволили налаштувати поверхню корту відповідно заданому візуальному стилю, а фізика може бути додатково налаштована для імітації реальних типів покриття уже безпосередньо користувачем.

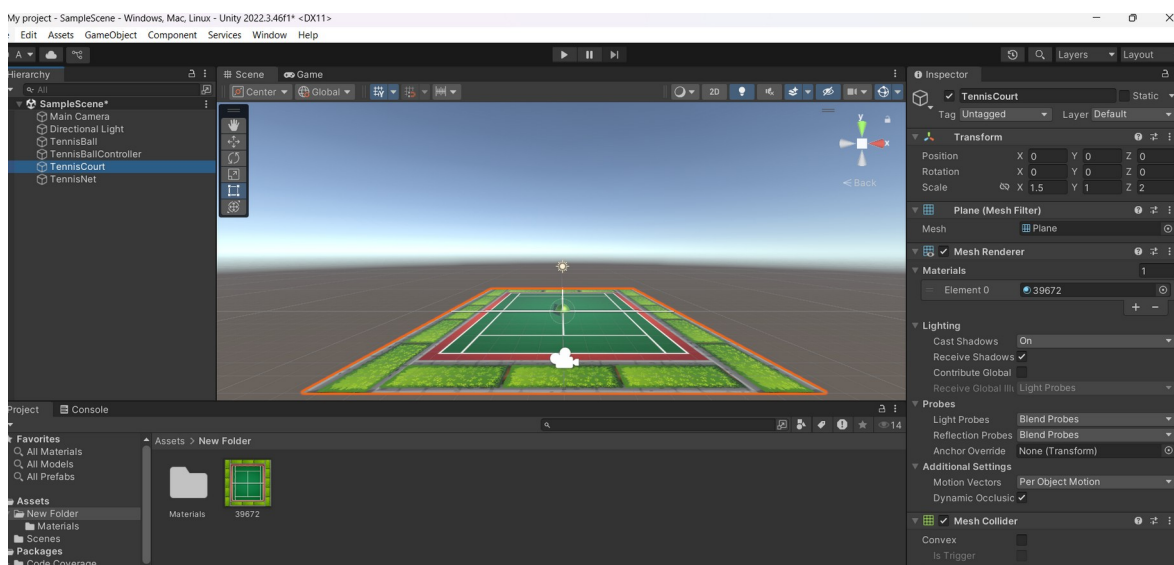


Рис.2.5. Візуалізація покриття корту

Архітектура VR-системи "Тенісний корт" характеризується модульною структурою, що забезпечує ефективну та реалістичну симуляцію гри в теніс у віртуальному середовищі. Центральним елементом системи є графічний модуль, побудований на платформі Unity, який відповідає за візуалізацію віртуального корту, тенісного м'яча та навколишнього середовища. Використання Unity дозволяє досягти високої якості графіки та реалістичності зображення, що є критично важливим для створення ефекту присутності у віртуальній реальності.

Для забезпечення реалістичної поведінки м'яча в системі інтегровано фізичний рушій, який моделює динаміку руху м'яча з урахуванням фундаментальних фізичних законів. Цей модуль обчислює траєкторію м'яча, враховуючи гравітаційне прискорення, силу опору повітря та ефект Магнуса, що виникає внаслідок обертання м'яча. Використання точних фізичних моделей забезпечує реалістичну симуляцію руху м'яча, що є ключовим для створення автентичного ігрового досвіду.

Інтерактивний модуль забезпечує взаємодію користувача з віртуальним середовищем за допомогою контролерів VR. Цей модуль дозволяє користувачеві відбивати м'яч, змінювати напрямок та силу удару, імітуючи реальні рухи тенісиста. Для коректної інтерпретації рухів користувача в системі передбачена система управління введенням, яка аналізує дані з датчиків руху контролерів VR та транслює їх у відповідні дії у віртуальному середовищі. Ця система забезпечує високу точність та швидкість реакції, що є важливим для динамічної гри в теніс.

Для аналізу та вдосконалення ігрового процесу в системі реалізовано систему реєстрації дій, яка записує та аналізує ключові ігрові параметри, такі як швидкість м'яча, траєкторія руху, сила удару та реакція користувача. Ця система дозволяє отримувати цінну інформацію для подальшого вдосконалення системи, а також може бути використана для тренувань та аналізу ігрових стратегій.

Таким чином, архітектура VR-системи "Тенісний корт" поєднує в собі передові технології графічного моделювання, фізичної симуляції та інтерактивної взаємодії, що дозволяє створити реалістичний та захоплюючий віртуальний досвід гри в теніс.

Висновки до розділу 2

У другому розділі кваліфікаційної роботи було представлено процес розробки VR-системи для реабілітації військовослужбовців, що включає в себе проектування, опис архітектурних та функціональних аспектів, а також розробку основних модулів.

Розглянуто процес проектування VR-системи, що включав аналіз функціональних та нефункціональних вимог, вибір платформи розробки Unity та опис основних напрямків розробки реабілітаційних сценаріїв. Визначено, що Unity є оптимальним вибором для розробки VR-системи завдяки її потужним можливостям для створення інтерактивних 3D-додатків, підтримці різних платформ та наявності великої спільноти розробників.

Описано архітектурні та функціональні аспекти VR-системи "Тенісний корт". Представлено діаграму класів, що відображає статичну структуру системи, та діаграму послідовностей, що демонструє динамічну взаємодію між компонентами. Описано процес розробки основних модулів системи у середовищі Unity.

3 ТЕСТУВАННЯ VR-СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

3.1 Тестування VR-системи

Розробка та впровадження VR-системи "Тенісний корт" для реабілітації військових з втратою верхньої кінцівки вимагає комплексного підходу до тестування та оптимізації. Метою цього процесу є забезпечення високої продуктивності, адаптації до індивідуальних потреб користувачів та ергономічності використання системи.

Оцінка продуктивності VR-додатку є критично важливим етапом, що дозволяє виявити та усунути потенційні проблеми, що можуть вплинути на якість реабілітаційного процесу. Вимірювання продуктивності включало аналіз ряд параметрів: частота кадрів, затримка, навантаження на графічний процесор, використання пам'яті, якість графіки.

Частота кадрів (Frame Rate) – це забезпечення стабільної частоти кадрів (не менше 90 кадрів/с), що є необхідним для запобігання кіберхворобі та створення комфортного віртуального середовища.

Перший етап полягав у встановленні базових метрик продуктивності. За допомогою інструментів профілювання, інтегрованих в Unity, було проведено вимірювання частоти кадрів у різних сценаріях гри: тренувальний режим, режим вільної гри та тестування навичок. Це дозволило визначити проблемні зони, де частота кадрів опускалася нижче критичного порогу в 90 кадрів/секунду, необхідного для комфортного VR-досвіду (див. Додаток А, рис. 1).

Другий етап був присвячений аналізу причин низької продуктивності. Для цього провели аналіз складності 3D-моделей, кількості полігонів, якості текстур та використання шейдерів. Було виявлено, що деякі моделі корту та м'яча були надмірно деталізовані, що призводило до високого навантаження на графічний процесор. Саме тому, застосували техніки оптимізації, такі як зниження полігональності, використання LOD (рівнів деталізації) та оптимізація текстур.

Фізичний рушій, що моделює поведінку м'яча, також вимагав оптимізації. Для цього провели аналіз алгоритмів розрахунку траєкторії та зіткнень, виявивши

можливість спрощення деяких обчислень без втрати реалістичності. Було зменшено кількість обчислень, що виконуються на кожному кадрі, особливо при моделюванні складних траєкторій м'яча.

Було проведено аналіз коду на предмет наявності "вузьких місць", що впливають на продуктивність. Виявлено, що деякі функції обробки вхідних даних та оновлення стану гри виконувалися неефективно. Тому застосували техніки оптимізації коду, такі як кешування даних, використання пулів об'єктів та асинхронне виконання завдань.

Третій етап полягав у тестуванні та валідації внесених змін – було проведено серію тестів продуктивності, використовуючи різні конфігурації обладнання та сценарії гри. Було підтверджено, що оптимізація графіки, фізичної симуляції та коду призвела до стабільного досягнення цільової частоти кадрів у 90 кадрів/секунду.

Четвертий етап включав в себе тестування користувацького досвіду. Для цього було проведено серію сеансів гри з різними користувачами. Було підтверджено, що оптимізація продуктивності не вплинула на якість ігрового процесу та не призвела до появи артефактів або нереалістичної поведінки.

Таким чином, процес налагодження частоти кадрів у VR-системі "Тенісний корт" був комплексним та ітеративним, що дозволило досягти високої продуктивності та забезпечити комфортний VR-досвід для користувачів.

Процес налагодження затримки (Latency) (мінімальна затримка між рухами користувача та їх відображенням у віртуальному просторі є критично важливою для забезпечення реалістичності взаємодії) полягав у аналізі архітектури системи з метою виявлення її потенційних джерел. Це включало оцінку ефективності алгоритмів обробки даних, швидкодії графічного рушія, а також продуктивності апаратного забезпечення. Було встановлено, що ключовими факторами, що впливають на затримку, є швидкість обробки даних з контролерів VR, час рендерингу кадрів та затримка передачі даних між компонентами системи. Було проведено оптимізацію коду та налаштування параметрів системи з метою зменшення затримки. Це включало оптимізацію алгоритмів рендерингу,

зменшення кількості полігонів у віртуальному середовищі, а також налаштування параметрів синхронізації між компонентами системи. Було досягнуто значного зменшення затримки, що дозволило забезпечити більш реалістичну взаємодію користувача з віртуальним середовищем (див. Дод. А. рис. 2).

Було проведено профілювання продуктивності з використанням спеціалізованих інструментів, таких як NVIDIA Nsight Systems та Intel VTune Amplifier. Ці інструменти дозволили збирати детальні дані про навантаження на CPU та GPU, виявляючи потенційні "вузькі місця" та ділянки коду, що потребують оптимізації.

Далі, було проведено аналіз отриманих даних з метою виявлення причин високого навантаження. На основі аналізу було виявлено, що основною причиною високого навантаження на GPU є складні графічні ефекти та висока роздільна здатність рендерингу. Для вирішення цієї проблеми було проведено оптимізацію графічних налаштувань, включаючи зменшення роздільної здатності, використання більш ефективних алгоритмів рендерингу та оптимізацію шейдерів.

Також, було виявлено, що високе навантаження на CPU спричинене складними фізичними розрахунками. Для вирішення цієї проблеми було проведено оптимізацію алгоритмів, включаючи використання більш ефективних структур даних та алгоритмів, а також паралелізацію обчислень.

На кожному етапі оптимізації проводилося повторне профілювання продуктивності для оцінки ефективності внесених змін. Також, проводилося тестування стабільності та надійності системи з метою виявлення потенційних помилок та збоїв.

Особливу увагу було приділено тестуванню на різних конфігураціях обладнання, включаючи різні моделі GPU та CPU, з метою забезпечення сумісності та оптимальної продуктивності системи на широкому спектрі пристроїв (див. дод А, рис. 3 та рис. 4).

В результаті проведеної роботи було досягнуто значного зниження навантаження на GPU та CPU, що дозволило забезпечити плавну та комфортну роботу VR-системи "Тенісний корт" навіть на відносно слабких конфігураціях

обладнання.

Процес налагодження використання пам'яті в програмному забезпеченні є критично важливим етапом, що вимагає систематичного та наукового підходу. Аналіз використання пам'яті дозволяє виявити потенційні проблеми з витоком пам'яті, надмірним споживанням ресурсів та оптимізувати роботу програми для забезпечення її стабільності та продуктивності.

Саме тому було створено тестові сценарії, які дозволяють відтворити умови, що призводять до витоків пам'яті або надмірного споживання ресурсів. Це дозволяє розробникам локалізувати проблему та внести необхідні зміни в код.

На завершальному етапі було проведено стрес-тестування. Програма була запущена в умовах високого навантаження, щоб перевірити її стійкість до витоків пам'яті та інших проблем, пов'язаних з використанням ресурсів (див. Додаток Б).

Для вимірювання продуктивності використовували спеціалізовані інструменти та методи, такі як профілювальники, бенчмарки та аналіз журналів. Оцінка якості VR-додатку включає в себе суб'єктивну оцінку користувачів, а також об'єктивні вимірювання, такі як точність відстеження рухів та реалістичність фізичної моделі.

3.2 Опис інсталяції та вимог до обладнання VR-системи

Процес інсталяції VR-системи «Тенісний корт» передбачає комплексний підхід, що включає як налаштування апаратного, так і програмного забезпечення, оскільки ефективність роботи системи безпосередньо залежить від продуктивності обладнання, точності сенсорів та оптимізації програмного середовища.

На етапі налаштування апаратного забезпечення першочергово необхідно забезпечити відповідність персонального комп'ютера мінімальним системним вимогам для стабільного функціонування VR-додатку. Зокрема, рекомендується використовувати центральний процесор із тактовою частотою не менше 3.5 ГГц, що дозволяє зменшити затримки при обробці великого обсягу обчислень,

характерних для візуалізації реального часу. Обсяг оперативної пам'яті має становити не менше 16 ГБ, оскільки VR-середовища оперують великими масивами даних, включаючи текстури високої роздільної здатності, фізичні моделі об'єктів та алгоритми штучного інтелекту для симуляції суперників. Графічна підсистема також відіграє ключову роль: рекомендовано використовувати відеокарту з об'ємом відеопам'яті не менше 8 ГБ, що забезпечить підтримку рейтрейсингу (Ray Tracing) та оптимальне згладжування зображення без втрати продуктивності.

Для занурення у віртуальну реальність необхідно використовувати VR-гарнітуру з високою роздільною здатністю (не менше 2160×2160 пікселів на око) та частотою оновлення екрана від 90 Гц, що мінімізує ефект змазування (Motion Blur) та сприяє комфортному сприйняттю віртуального простору. Контролери руху повинні забезпечувати точне відстеження позиції та орієнтації в просторі, що є критичним для реалістичного моделювання ударів та рухів гравця.

Наступним кроком є встановлення системи відстеження руху (Motion Tracking), яка може базуватися на зовнішніх сенсорах (наприклад, базові станції Lighthouse для HTC Vive) або бути інтегрованою в гарнітуру (Inside-Out Tracking у Meta Quest). Важливими параметрами вибору є точність позиційного трекінгу (менше 1 мм похибки), частота оновлення даних (не менше 120 Гц) та наявність широкого кута огляду, що зменшує ймовірність втрати позиційного сигналу при активних рухах користувача.

Окрему увагу слід приділити встановленню додаткових фізіотерапевтичних датчиків, які можуть застосовуватися для контролю сили удару, амплітуди рухів, швидкості переміщення та рівня навантаження на суглоби. Такі пристрої, як інерціальні сенсори (IMU), наприклад Xsens MVN або Perception Neuron, дозволяють аналізувати кінематику рухів у режимі реального часу та можуть використовуватися для підвищення точності взаємодії з віртуальними об'єктами.

На етапі налаштування програмного забезпечення необхідно встановити операційну систему Windows 10 або 11, що має вбудовану підтримку VR через

Windows Mixed Reality, OpenXR або SteamVR. Також важливо оновити драйвери для VR-гарнітури, контролерів руху та системи відстеження руху, оскільки старі версії можуть спричиняти затримки сигналу або конфлікти з іншими програмами.

Інсталяція самої VR-системи «Тенісний корт» включає кілька ключових компонентів:

1) Графічний модуль, який відповідає за візуалізацію сцени, рендеринг анімацій та обробку освітлення.

2) Фізичний рушій, що моделює поведінку тенісного м'яча відповідно до законів механіки, з урахуванням аеродинамічного опору, ефекту Магнуса та зіткнень з ракеткою.

3) Інтерактивний модуль, який забезпечує обробку введених користувачем команд та реакцію системи на виконанні рухи.

4) Мережевий модуль (за потреби), що дозволяє організовувати багатокористувацькі ігри через інтернет або локальну мережу.

Після інсталяції слід провести калібрування VR-системи, що включає налаштування положення сенсорів, калібрування контролерів руху та регулювання інтерпупілярної відстані (IPD) VR-гарнітури для уникнення спотворень зображення. Також необхідно налаштувати параметри фізіотерапевтичних датчиків, визначивши референтні значення амплітуди рухів та сили ударів для подальшого аналізу ефективності гри.

Окрім цього, для безпечного використання VR-системи слід забезпечити достатній простір для вільного пересування користувача. Рекомендовані параметри вільної зони складають мінімум 2×2 метри, а у випадку активної ігрової взаємодії — 3×3 метри. Встановлення захисних матів може зменшити ризик травм у разі втрати рівноваги, а спеціальні індикатори межі простору (Guardian System, Chaperone) допоможуть уникнути зіткнень із реальними об'єктами.

Таким чином, комплексний підхід до інсталяції VR-системи «Тенісний корт» забезпечує не лише стабільну роботу програмного забезпечення, а й точне

відстеження рухів, мінімізацію затримок у візуалізації та високий рівень безпеки користувача, що є критичним для отримання реалістичного ігрового досвіду.

3.2 Перспективи розвитку та вдосконалення VR-системи

Віртуальна реальність (VR) є перспективною технологією, яка демонструє значний потенціал для використання у сфері реабілітації та медичних практик. Сучасні VR-системи поступово трансформуються з інструментів розваг у високотехнологічні рішення для покращення фізичного, психологічного та когнітивного стану пацієнтів. Удосконалення VR-технологій дозволяє адаптувати їх для різних категорій користувачів, підвищуючи ефективність реабілітаційних програм та розширюючи сферу їх застосування.

Одним із ключових напрямів розвитку є розширення функціоналу VR-систем для реабілітації. Впровадження спеціалізованих алгоритмів і адаптивних сценаріїв дозволяє використовувати VR у фізичній реабілітації після травм, операцій або неврологічних захворювань. Наприклад, інтеграція тактильного зворотного зв'язку та біомеханічного моніторингу допомагає пацієнтам відновлювати моторику після інсультів або черепно-мозкових травм. Подібні системи вже застосовуються в європейських клініках, де вони імітують реальні рухові завдання та стимулюють нейропластичність. Крім того, VR-терапія ефективна у сфері лікування больового синдрому, оскільки може відволікати пацієнта від болю та сприяти релаксації м'язів.

Психологічна реабілітація також є важливою сферою застосування VR-систем. Сучасні дослідження підтверджують ефективність VR у лікуванні посттравматичного стресового розладу (ПТСР), фобій та тривожних розладів. Пацієнти можуть занурюватися в безпечне віртуальне середовище, що дозволяє поступово адаптуватися до тригерних ситуацій без загрози для їхнього психічного стану. Наприклад, технології експозиційної терапії у VR вже використовуються для лікування ветеранів із бойовим ПТСР у США. Окрім того, VR сприяє зниженню рівня стресу та покращенню емоційної стабільності у пацієнтів із депресією або когнітивними розладами.

Наступним важливим напрямом є інтеграція штучного інтелекту (ШІ) для персоналізації реабілітаційних програм. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє створювати адаптивні сценарії, які автоматично коригують рівень складності вправ відповідно до прогресу пацієнта. Наприклад, нейромережі можуть аналізувати біометричні показники (пульс, рівень насичення крові киснем, електроенцефалографічні дані) і змінювати динаміку реабілітаційної програми. Це особливо важливо для пацієнтів із неврологічними розладами, у яких необхідно враховувати індивідуальні особливості рухових і когнітивних можливостей. Додатково ШІ може застосовуватися для аналізу поведінки користувачів у VR-середовищі, що дозволяє прогнозувати можливі ризики регресу або адаптувати терапевтичні методики до особистих потреб.

Важливим аспектом перспективного розвитку є впровадження VR-систем у клінічну практику та їхнє масове використання. Незважаючи на те, що технологія VR вже застосовується в окремих медичних закладах, її інтеграція у повсякденну практику потребує подолання низки бар'єрів, зокрема фінансових та нормативних. Одним із ключових рішень може стати розробка доступних мобільних VR-платформ, які можна використовувати вдома під дистанційним контролем лікаря. Такі технології сприятимуть більшій залученості пацієнтів у процес реабілітації, знижуючи потребу у стаціонарному лікуванні.

Також важливим є впровадження VR у масову профілактику захворювань. Наприклад, інтерактивні VR-програми можуть мотивувати людей до здорового способу життя, покращувати рівень фізичної активності або навчати правильним методам релаксації для зниження рівня стресу. Вже сьогодні деякі фітнес-програми у VR дозволяють користувачам тренуватися в імітованих природних ландшафтах, що підвищує їхню мотивацію та ефективність фізичних вправ.

Загалом, перспективи розвитку VR-систем у сфері реабілітації та медицини є надзвичайно широкими. Удосконалення технологічної складової, інтеграція штучного інтелекту та розширення сфер застосування сприятимуть більш ефективному використанню цих систем у клінічній практиці та їх популяризації серед широких верств населення.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі представлено результати комплексного тестування VR-системи "Тенісний корт", а також окреслено перспективи її подальшого розвитку.

Під час тестування VR-системи особливу увагу було приділено оцінці її продуктивності, яка є критично важливою для забезпечення комфортного та ефективного реабілітаційного процесу. Проведено детальний аналіз частоти кадрів, затримки, навантаження на графічний та центральний процесори, а також використання пам'яті. Завдяки застосуванню методів профілювання, оптимізації графіки, фізичної симуляції та коду, вдалося досягти стабільної роботи системи з цільовою частотою кадрів у 90 кадрів/секунду та мінімізувати затримку. Це забезпечило плавний та реалістичний VR-досвід для користувачів.

Окрім продуктивності, було розглянуто аспекти інсталяції та вимог до обладнання VR-системи. Визначено, що ефективність роботи системи залежить від продуктивності комп'ютера, точності сенсорів та оптимізації програмного середовища. Розглянуто рекомендації щодо вибору апаратного забезпечення, налаштування програмного забезпечення, калібрування сенсорів та забезпечення безпеки користувача.

Результати тестування та аналіз перспектив розвитку підтверджують ефективність та потенціал VR-системи "Тенісний корт" для реабілітації військовослужбовців з втратою верхньої кінцівки. Подальші дослідження та вдосконалення системи сприятимуть її широкому впровадженню у медичну практику та покращенню якості життя пацієнтів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплексне дослідження, спрямоване на розробку VR-системи для реабілітації військових та ветеранів.

1) Проведений аналіз сучасних VR-технологій та існуючих VR-рішень для реабілітації став фундаментом для всієї подальшої роботи. Оскільки не лише окреслив актуальний стан VR-індустрії, але й дозволив критично оцінити наявні VR-рішення в контексті реабілітації. Виявлення переваг (наприклад, високий рівень залучення, можливість створення контрольованих та безпечних середовищ, гнучкість у налаштуванні сценаріїв) та недоліків (таких як потенційний motion sickness, висока вартість обладнання, необхідність спеціалізованого навчання) існуючих підходів дало змогу автору роботи прийняти обґрунтовані рішення щодо вибору конкретних технологій та підходів для власної розробки.

Зокрема, цей етап дослідження дозволив: визначити найбільш перспективні VR-платформи та інструменти розробки, які найкраще відповідають цілям реабілітації військових та ветеранів; ідентифікувати ключові функціональні можливості, які є найбільш цінними для реабілітаційних програм на основі VR (наприклад, відстеження рухів, імітація реальних сценаріїв, забезпечення зворотного зв'язку); зрозуміти потенційні бар'єри та виклики при впровадженні VR-технологій у реабілітаційний процес та закласти основи для їх подолання; обґрунтувати оригінальність розробленої системи шляхом виявлення прогалин у існуючих рішеннях та визначення унікальних аспектів власного підходу.

2) Проектування VR-системи з урахуванням функціональних та нефункціональних вимог став ключовим у перетворенні теоретичних знань та результатів аналізу в конкретну архітектуру майбутньої VR-системи. Ретельне визначення функціональних вимог (що система повинна робити, наприклад, відтворення певних вправ, симуляція бойових ситуацій, забезпечення зворотного зв'язку) та нефункціональних вимог (як система повинна працювати, наприклад, продуктивність, зручність використання, безпека, масштабованість) забезпечило

чітке розуміння цілей розробки.

Розробка архітектури системи, визначення основних модулів (наприклад, модуль візуалізації, модуль взаємодії, модуль відстеження прогресу) та їх взаємозв'язків створили структурну основу для подальшої реалізації. Формулювання вимог до користувацького інтерфейсу (інтуїтивність, доступність, ергономічність) та технічних характеристик (мінімальні та рекомендовані системні вимоги, сумісність з VR-обладнанням) гарантувало, що розроблена система буде не лише функціональною, але й зручною та ефективною для кінцевих користувачів.

3) Реалізація основних модулів VR-системи, зокрема графічного – забезпечило створення візуально привабливого та реалістичного віртуального середовища, що є критично важливим для залучення користувачів та забезпечення ефекту присутності. Фізичний рушій надав можливість імітувати реалістичну поведінку об'єктів у віртуальному просторі, що є важливим для створення правдоподібних сценаріїв реабілітації.

Інтерактивний модуль забезпечив можливість користувачам взаємодіяти з віртуальним середовищем за допомогою VR-контролерів або інших пристроїв введення, що є ключовим аспектом для виконання реабілітаційних вправ та завдань. Успішна інтеграція цих модулів свідчить про створення функціональної основи VR-системи, здатної виконувати поставлені завдання.

4) Етап тестування був важливим для підтвердження працездатності розробленої системи та її відповідності визначеним вимогам. Комплексний підхід до тестування, що включав функціональне тестування (перевірка коректності виконання функцій), тестування продуктивності (оцінка швидкодії та стабільності роботи), тестування зручності використання (оцінка інтуїтивності та ергономічності інтерфейсу) та тестування безпеки (перевірка на наявність вразливостей), дозволив всебічно оцінити якість розробленої VR-системи.

Позитивні результати тестування підтвердили, що система є працездатною та відповідає основним вимогам, що є важливим кроком до її потенційного

впровадження.

5) Розроблені рекомендації свідчать про розуміння автором роботи перспектив розвитку створеної VR-системи та шляхів її практичного застосування. Пропозиції щодо розширення функціональних можливостей (наприклад, додавання нових реабілітаційних сценаріїв, інтеграція з іншими реабілітаційними методиками), підвищення продуктивності (оптимізація коду, використання більш ефективних алгоритмів), покращення користувацького інтерфейсу (наприклад, надання більшої кількості налаштувань, покращення візуальної складової) та розробки методичних рекомендацій щодо використання системи в реабілітаційному процесі (наприклад, розробка протоколів використання для різних видів травм) є цінним внеском та демонструють потенціал для подальшого розвитку проекту.

Отже, створення працездатної VR-системи, підтверджене результатами тестування, демонструє перспективність обраного підходу. Розроблена система має потенціал стати ефективним інструментом для відновлення фізичних та психологічних функцій, покращення якості життя та соціальної адаптації цієї важливої категорії населення. Запропоновані рекомендації щодо подальшого вдосконалення та впровадження створюють основу для майбутнього розвитку цього напрямку досліджень та практичного застосування VR-технологій у сфері реабілітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Laver, K., Lange, B., George, S., Deutsch, J. E., Saposnik, G., & Crotty, M. Virtual reality for stroke rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2017. № 11(11). CD008349. DOI: 10.1002/14651858.CD008349.pub4.
2. Parsons, T. D., & Rizzo, A. A. Affective outcomes of virtual reality exposure therapy for anxiety and specific phobias. *Psychological Services*. 2015. DOI: 10.1016/j.jbtep.2007.07.007.
3. PTSD in the military [Електронний ресурс] // ARPP. 2023. Режим доступу: <https://arpp.com.ua/articles/ptsd-in-the-military/> (дата звернення: 2025-06-25).
4. Rizzo, A., & Koenig, S. Virtual Reality for Psychological and Neurocognitive Interventions. *Annual Review of Clinical Psychology*. 2017. Vol. 13, № 1. P. 253-282.
5. Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI*. 2016. Volume 3. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074>.
6. VR реабілітація постраждалих від війни [Електронний ресурс] // Artherapy Force. URL: <https://artherapyforce.com.ua/project/vr-reabilitatsiya-postrazhdalych-vid-vijny/> (дата звернення: 2025-01-25).
7. VR, іпотерапія, відновлення через мистецтво: Інноваційні методи реабілітації військових в Україні [Електронний ресурс] // Bzh.life. 2024. 28 лютого. URL: <https://bzh.life/ua/plany/1714567220-vr-ipoterapiya-vidnovlennya-cherez-mistetstvo/> (дата звернення: 2025-01-25).
8. Допомога військовим з посттравматичним стресовим розладом [Електронний ресурс] // РНС. 2023. Режим доступу: <https://phc.org.ua/news/dopomoga-viyskovim-z-posttravmatichnim-stresovym-rozladom>.
9. Дорошенко, М. Н. Травматичний стрес та ПТСР [Електронний ресурс] // Pwpp.uksw.edu.pl. 2022. Режим доступу: <https://pwpp.uksw.edu.pl/wp-content/uploads/2022/07/Травм.-стрес-та-ПТСР.->

[Дорошенко-М.Н_.pdf.](#)

10. Здолати «фантома». Як VR допомагає реабілітації українських військових і ветеранів [Електронний ресурс] // AIN.UA. 2024. 28 серпня. URL: <https://ain.ua/2024/08/28/zdolati-fantoma-iak-vr-dopomagaje-reabilitaciyi-ukrayinskix-viiskovix-i-veteraniv/> (дата звернення: 2025-01-25).

11. Інноваційні технології в реабілітації: Роботизовані системи та віртуальна реальність [Електронний ресурс] // Національний медичний університет імені О.О. Богомольця. 2024. 12 листопада. URL: <https://www.bsmu.edu.ua/blog/innovacijni-tehnologiyi-v-reabilitaciyi-robotyzovani-systemy-ta-virtualna-realnist/> (дата звернення: 2025-01-25).

12. Коваль, О. VR для розмінування, реабілітації та культури. Як стартап Aspichi адаптував свої VR-технології до потреб війни [Електронний ресурс] // DOU.ua. 2023. 2 листопада. URL: <https://dou.ua/lenta/interviews/aspichi-about-their-vr-projects-and-war/> (дата звернення: 2024-12-05).

13. Лікування посттравматичного стресового розладу (ПТСР) [Електронний ресурс] // Pleso.me. 2023. Режим доступу: <https://pleso.me/ua/treatment/ptsd>.

14. Посттравматичний синдром – прихована загроза [Електронний ресурс] // Тиждень.ua. 2023. Режим доступу: <https://tyzhden.ua/posttravmatychnyj-syndrom-prykhovana-zahroza/>.

15. Посттравматичний стресовий розлад у військових [Електронний ресурс] // Superhumans. 2023. Режим доступу: <https://superhumans.com/blog/posttravmatychnyj-stresovyj-rozlad-u-vijskovyh/>.

16. Посттравматичний стресовий розлад у військовослужбовців – учасників бойових дій [Електронний ресурс] // Narkosumy.lic.org.ua. 2023. Режим доступу: <https://narkosumy.lic.org.ua/statti/posttravmatychnyj-stresovyj-rozlad-u-vijskovosluzhbovtsiv-uchasnykiv-bojovyh-dij/>.

17. Реабілітація та віртуальна реальність: як нові технології допомагають відновлюватись пораненим [Електронний ресурс] // Рубрика. 2023. URL: <https://rubryka.com/article/vr-terapiya-dlya-reabilitatsiyi/> (дата звернення: 2025-02-

25).

18. У Києві запрацював реабілітаційний центр для військових RECOVERY з VR-тренажерами (фото) [Електронний ресурс] // Хмарочос. 2024. 22 листопада. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2024/11/22/u-kyievi-zapraczyuvav-reabilitacijnyj-czentr-dlya-vijskovyh-recovery-z-vr-trenazheramy-foto/> (дата звернення: 2025-02-25).

19. Українська компанія розробила VR-тренажер, який допоможе військовим боротися з фантомними болями [Електронний ресурс] // ШоТам. 2024. 11 березня. URL: <https://shotam.info/ukrainska-kompaniia-rozrobyla-vr-trenazher-iakyy-dopomozhe-viyskovym-borotysia-z-fantomnymi-boliamy/> (дата звернення: 2025-06-25).

20. Українці створили VR-тренажер, який має допомогти військовим боротися з фантомними болями [Електронний ресурс] // The Village Україна. 2024. 10 березня. URL: <https://www.village.com.ua/village/city/city-news/348585-ukrayintsi-stvorili-vr-trenazher-yakiy-mae-dopomogti-viyskovym-borotysia-z-fantomnymi-bolyami> (дата звернення: 2025-01-25).

21. Шепель, А. І., & Горошко, В. І. Використання інноваційних методик віртуальної реальності у фізичній терапії пацієнтів із травмами опорно-рухового апарату [The use of innovative virtual reality techniques in the physical therapy of patients with musculoskeletal injuries]. *Rehabilitation & Recreation*. 2023. № 17(18). DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1795.2023.17.18>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Тестування VR-системи «Тенісний корт»

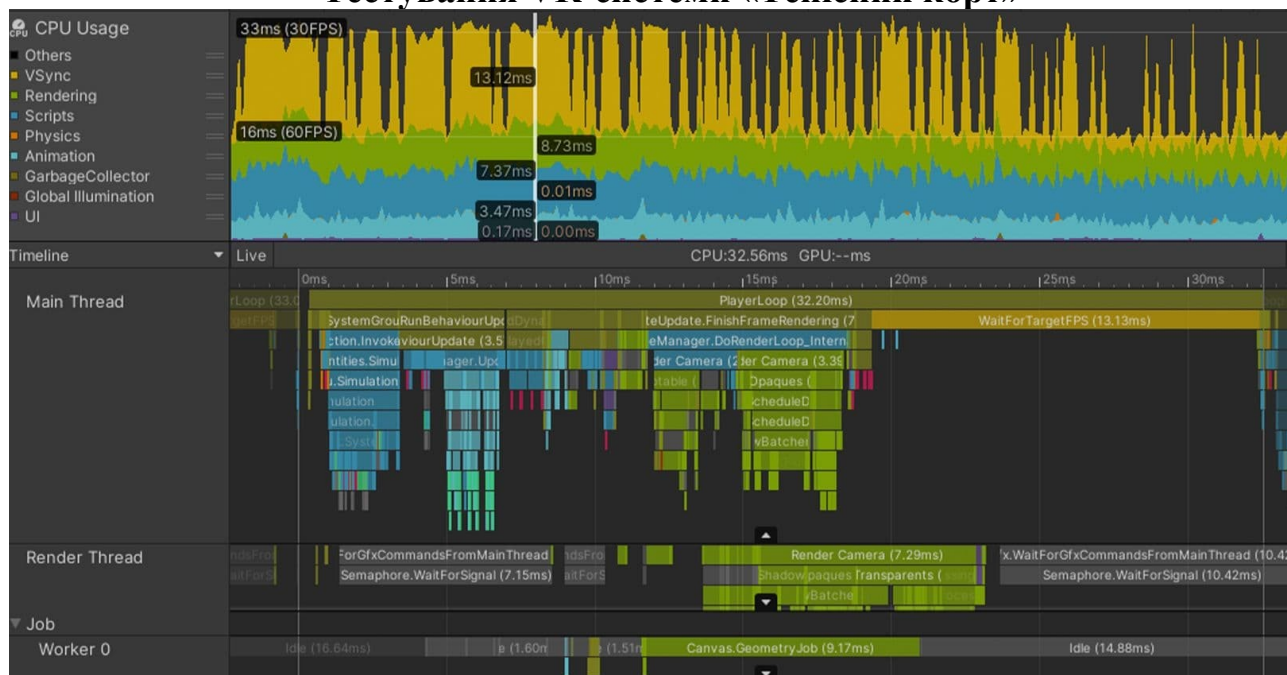


Рис. 1. Скріншот вікна діагностики частоти кадрів в Unity

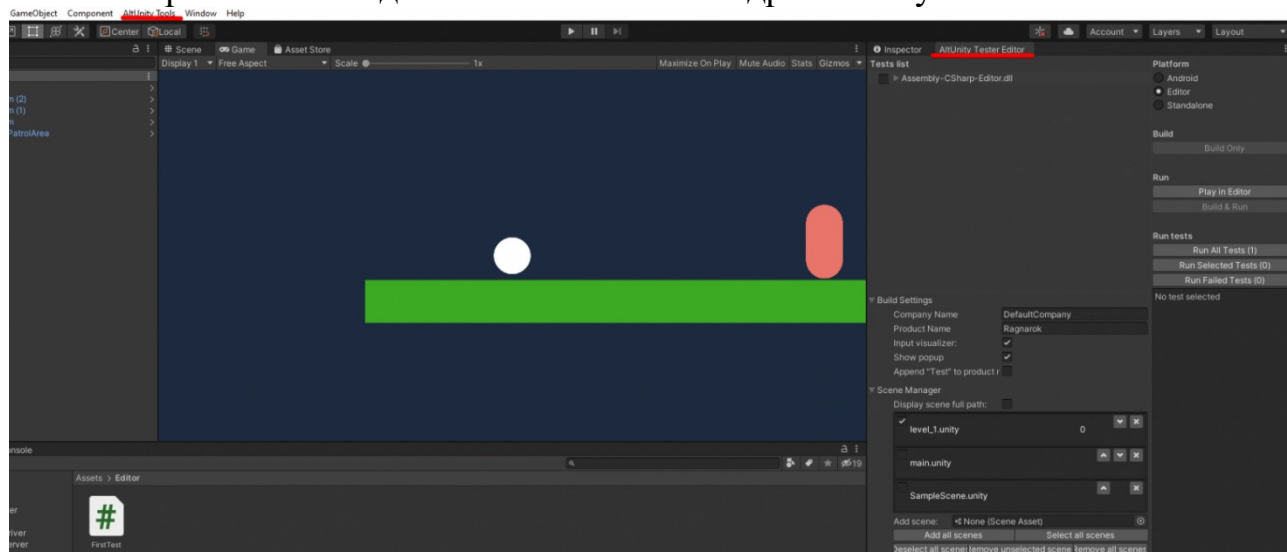


Рис. 2. Скріншот вікна діагностики затримки в Unity

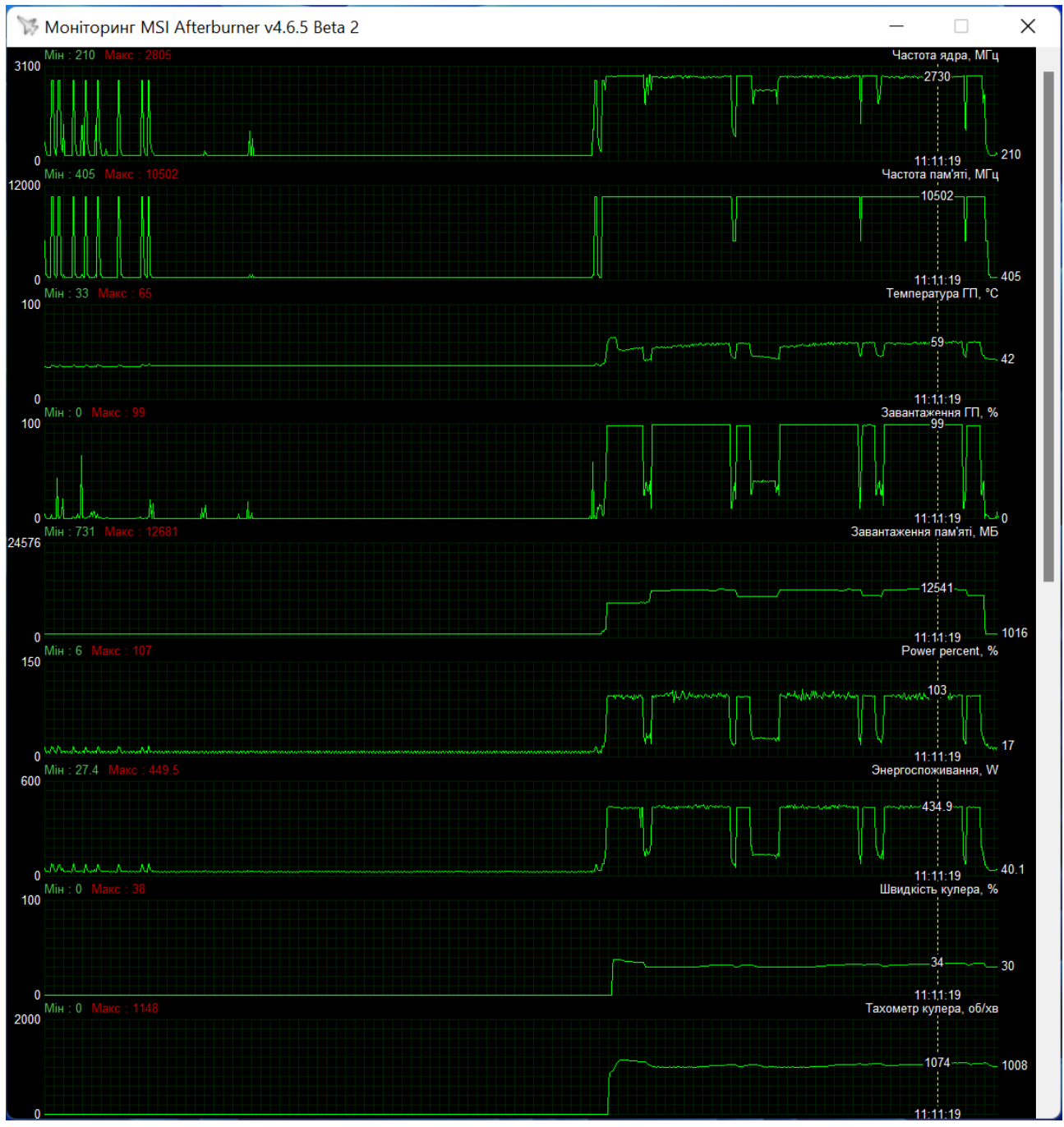


Рис. 3. Навантаження центральний процесор (CPU)

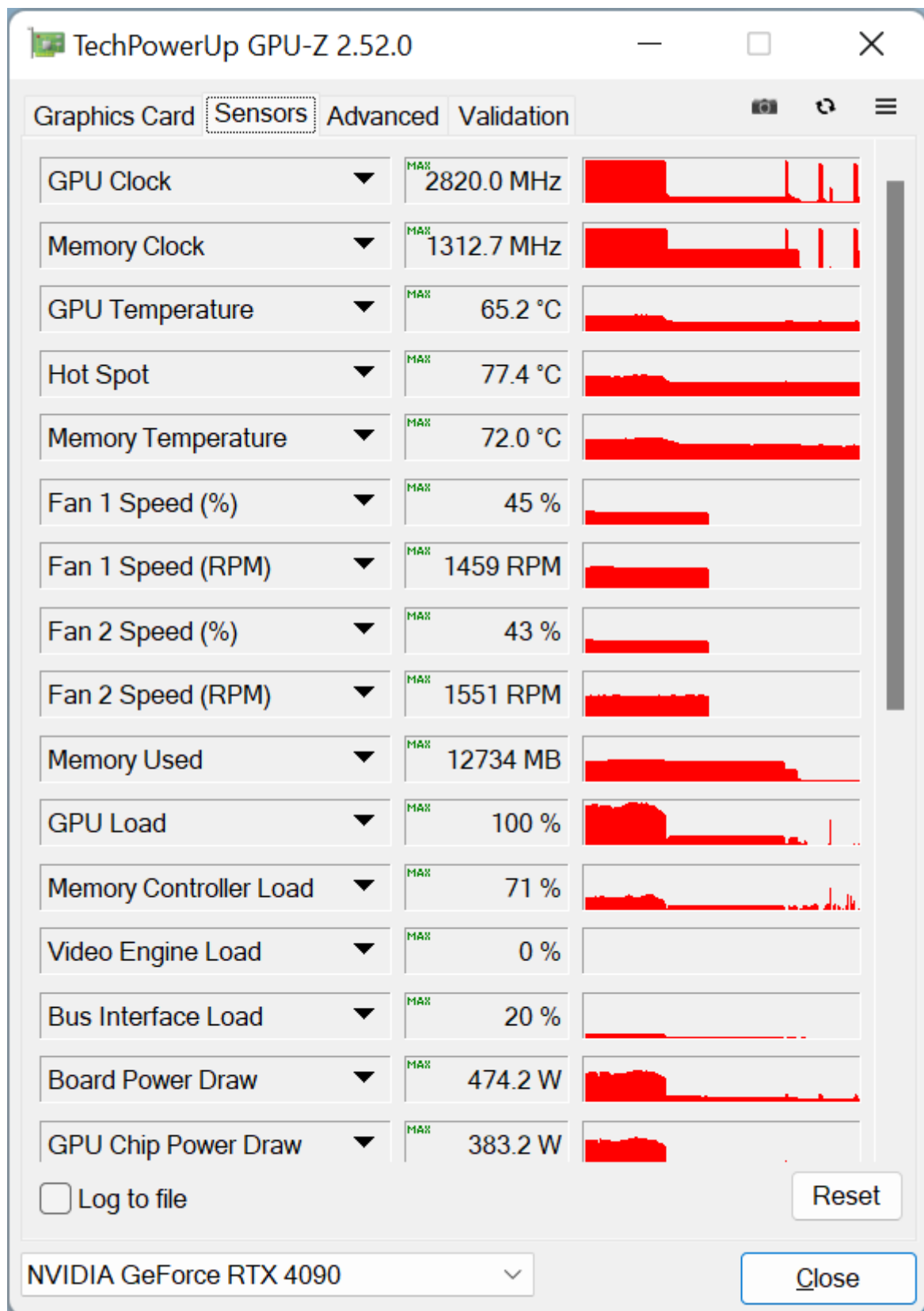


Рис. 4. Навантаження на графічний процесор (GPU)

Додаток Б

Тестові сценарії для VR-системи «Тенісний корт»

Мета тестування:

Визначити, чи є витрати пам'яті або надмірне використання ресурсів при тривалому використанні VR-системи, при зміні ігрових сцен і параметрів фізики об'єктів.

Передумови:

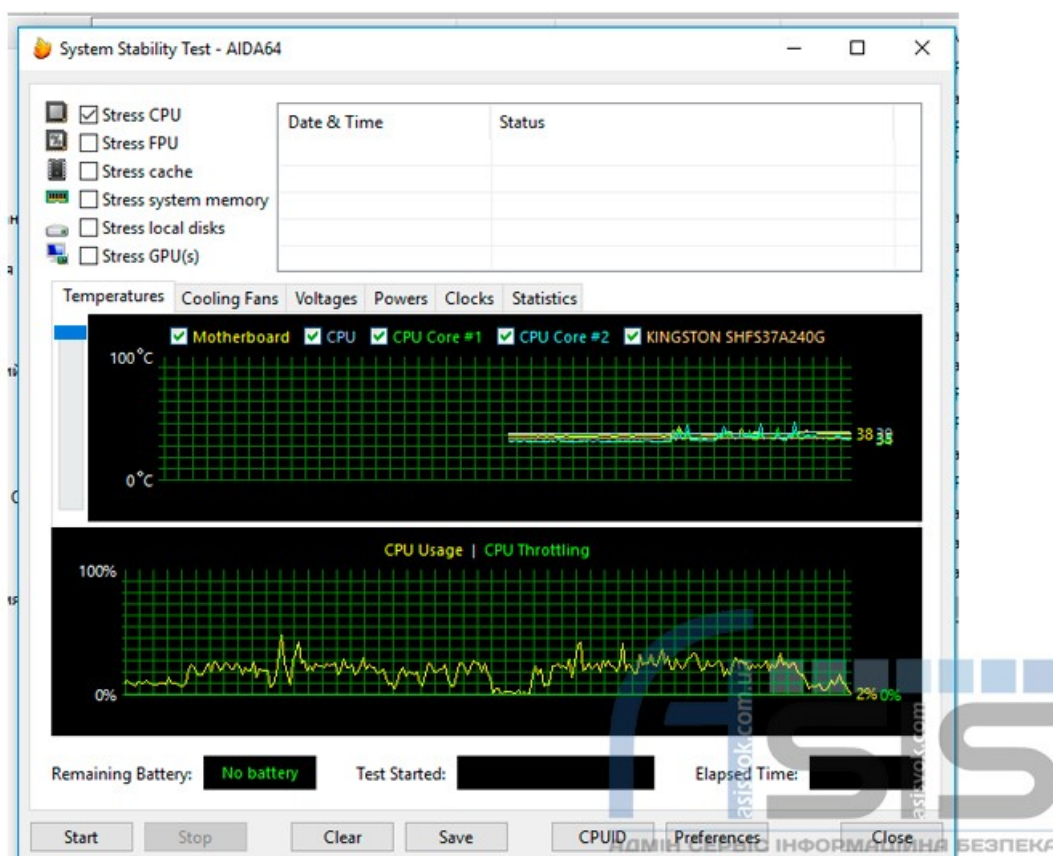
- Тестова система: Windows/Linux із підключеним VR-шоломом (Meta Quest, HTC Vive, Valve Index тощо).
- Активований режим **Performance Profiler** або сторонній інструмент аналізу пам'яті (**Visual Studio Profiler, Unity Profiler, NVIDIA Nsight**).
- VR-контролери підключені.
- Готовий тестовий користувач для симуляції ігрового процесу.

ТЕСТ-КЕЙС 1: СТРЕС-ТЕСТУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА ВИВАНТАЖЕННЯ СЦЕН

Кроки:

1. Запустити VR-додаток "Тенісний корт" у режимі **відлагодження** або підключити профайлер.
2. Переконаватися, що початкова сцена завантажилася коректно.
3. Протягом **30 хвилин** повторно перемикатися між наступними сценами:
 - Меню → Ігровий корт
 - Ігровий корт → Тренувальний режим
 - Тренувальний режим → Меню
4. Фіксувати використання оперативної пам'яті та VRAM на кожному етапі.
5. Повторити тест із різною кількістю об'єктів на сцені (від 2 до 50 м'ячів, додаткові гравці).

Результат:



ТЕСТ-КЕЙС 2: НАКОПИЧЕННЯ РЕСУРСІВ ПРИ ТРИВАЛІЙ ГРІ

Кроки:

1. Запустити VR-гру в режимі **симуляції матчів** (режим безперервної гри з AI-опонентом).
2. Використовувати режим автогри або записані дії користувача для 1+ години гри.
3. Логувати кожні 10 хвилин використання:
 - ОЗП (RAM)
 - Відеопам'ять (VRAM)
 - Навантаження на процесор (CPU)
 - Температуру GPU
4. Виконати зміну рівня деталізації об'єктів та освітлення на **максимальне** значення і повторити тест.

Результат:

```

1 reference
76 private float GenerateNoiseHeight(int z, int x, Vector2[] octaveOffsets)
77 {
78     float amplitude = 12;
79     float frequency = 1;
80     float persistence = 0.5f;
81     float noiseHeight = 0;
82
83     // Loop over octaves
84     for (int y = 0; y < octaveOffsets.Length; y++)
85     {
86         float mapZ = z / scale * frequency + octaveOffsets[y].y;
87         float mapX = x / scale * frequency + octaveOffsets[y].x;
88
89         // Create perlinValues
90         // The *2-1 is to create a flat floor level
91         float perlinValue = (Mathf.PerlinNoise(mapZ, mapX)) * 2 - 1;
92         noiseHeight += heightCurve.Evaluate(perlinValue) * amplitude;
93         frequency *= lacunarity;
94         amplitude *= persistence;
95     }
96     return noiseHeight;
  
```

ТЕСТ-КЕЙС 3: ВИТОКИ ПАМ'ЯТІ ПРИ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ЗНИЩЕННІ ОБ'ЄКТІВ

Кроки:

1. Запустити гру у **тренувальному режимі**.
2. Протягом 30 хвилин безперервно подавати та відбивати тенісні м'ячі.
3. Додатково протестувати з генерацією 100+ м'ячів одночасно.
4. Відстежувати видалення м'ячів після їх виходу за межі сцени.
5. За допомогою профайлера перевірити, чи звільняється пам'ять після видалення об'єктів.

Результат:

```

using UnityEngine;
using NUnit.Framework;
using UnityEngine;

namespace Tests
{
    public class InventoryTests
    {
        [Test]
        public void WhenStoringItemAndInventoryIsEmpty_ThenItemCountShouldBe1()
        {
            // Arrange
            CharacterInventory inventory = new GameObject().AddComponent<CharacterInventory>();
            inventory.CharStats = Substitute.For<CharacterStats>();
            stats.currentEmbraceance = 0;
            stats.maxEmbraceance = 10;
            inventory.CharStats.CharacterDefinition.Returns(stats);

            // Act
            ItemPickup itemToStore = new GameObject().AddComponent<ItemPickup>();
            inventory.StoreItem(itemToStore);

            // Assert
        }
    }
}
  
```