

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система управління бойовим вертольотом АН-64 у
віртуальній реальності»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Штучний інтелект
(назва)

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

_____ Валерій САФРОНОВ
(підпис) Ім'я, ПРИЗВИЩЕ здобувача

Виконав: здобувач вищої освіти гр.ШІД-42
Валерій САФРОНОВ

Керівник: Максим ФЕСЕНКО
д.т.н, професор *к.т.н. доцент*

Рецензент:

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Штучного інтелекту

Ступінь вищої освіти Бакалавр

Спеціальність 122 Комп'ютерні науки

Освітньо-професійна програма Штучний інтелект

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Штучного інтелекту

_____ Ольга ЗІНЧЕНКО

«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

_____ Сафронову Валерію

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Система управління бойовим вертольотом АН-64 у віртуальній реальності

керівник кваліфікаційної роботи д.т.н., професор,

(Ім'я, ПРИЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025р. № 56

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «23» травня 2025р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: Технічна документація та відкриті дані щодо конструкції та принципів управління бойовим вертольотом АН-64 Apache. Характеристики систем керування гелікоптером (cyclic, collective, педалі) та принципи їх моделювання. Середовище розробки Unreal Engine 5 з підтримкою Chaos Vehicle Plugin, OpenXR, EasyBallistics — як основа побудови VR-симуляції. VR-пристрої (Oculus, HTC Vive) з контролерами, сумісними з OpenXR для взаємодії у віртуальному середовищі. Технічні параметри комп'ютера/системи, необхідні для тестування VR-додатку. Графічні ресурси (3D-моделі, текстури, cockpit-дисплеї) для відтворення гелікоптера. Науково-

технічні джерела з тематики авіасимуляції, віртуальної реальності та обчислювальної динаміки польоту.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд сучасних технологій віртуальної реальності та VR-симуляторів

2. Аналіз конструкції та принципів управління бойовим вертольотом АН-64

3. Огляд засобів розробки VR-додатків (Unreal Engine 5, OpenXR, інші)

4. Постановка задачі створення VR-моделі управління гелікоптером

5. Реалізація фізичної моделі гелікоптера з Chaos Vehicle Plugin

6. Моделювання органів керування та систем стабілізації

7. Інтеграція VR-контролерів та бойової логіки (OpenXR, EasyBallistics)

8. Тестування роботи симуляції та оцінка її реалізму

9. Аналіз ефективності VR-системи та перспективи її застосування

5. Перелік графічного матеріалу: *презентація*

6. Дата видачі завдання «25» лютого 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз науково-технічної літератури з тематики віртуальної реальності, авіасимуляції та бойових систем керування	25.02-05.03.25	Виконано
2	Вивчення конструктивних особливостей гелікоптера АН-64, принципів роботи органів керування (cyclic, collective), бойових підсистем	05.11-12.03.25	Виконано
3	Дослідження сучасних технологій VR-розробки: Unreal Engine 5, Chaos Vehicle, OpenXR, EasyBallistics; постановка задачі проєкту	13.11-19.03.25	Виконано
4	Моделювання фізичної поведінки гелікоптера у середовищі UE5: налаштування мас, тяги, стабілізації, аеродинамічних характеристик	20.11-25.03.25	Виконано
5	Реалізація органів керування гвинтокрилом у VR: інтеракція cyclic/collective, трекінг рухів, логіка стабілізації, PID-регулятори	27.11-03.04.25	Виконано
6	Інтеграція VR-контролерів та бойових плагінів: симуляція стрільби через EasyBallistics, зв'язок з кокпітом через OpenXR	04.12-10.04.25	Виконано
7	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат	11.12-20.04.25	Виконано
8	Розробка демонстраційних матеріалів	21.12-31.05.25	Виконано

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Валерій САФРОНОВ

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

кваліфікаційної роботи

(підпис)

Максим ФЕСЕНКО

(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 63 стор., 14 рис., 20 джерел.

Мета роботи: Розробити та реалізувати інтерактивну VR-систему управління бойовим вертольотом АН-64, яка імітує фізику польоту, реагування на дії користувача та забезпечує занурення у реалістичне керування віртуальним літальним апаратом.

Об'єкт дослідження: Система віртуальної симуляції бойового вертольота АН-64 у середовищі Unreal Engine з використанням VR-технологій.

Предмет дослідження: Методи реалізації системи управління елементами бойового вертольота у віртуальній реальності, зокрема органів керування (cyclic, collective), стабілізації та симуляції фізичних властивостей повітряного судна за допомогою Chaos Vehicle Plugin, EasyBallistics та засобів OpenXR.

Короткий зміст роботи: У кваліфікаційній роботі розглянуто процес розробки системи управління бойовим вертольотом АН-64 у віртуальній реальності з використанням сучасних інструментів візуалізації, моделювання фізики та інтеграції пристроїв VR. У середовищі Unreal Engine 5 реалізовано фізичну модель гелікоптера з використанням Chaos Vehicle Plugin, що дозволяє точно імітувати аеродинамічні характеристики та інерційні властивості. Органи керування змодельовано у форматі VR-взаємодії за допомогою OpenXR: пілот може керувати апаратом через VR-контролери, які відтворюють ручки cyclic і collective. Система протестована на відповідність очікуваній поведінці гелікоптера в польоті, реалізовано повноцінний інтерфейс кабіни, інтерактивні елементи керування та ефект присутності у VR. Результати тестування підтвердили ефективність реалізованого підходу для використання в освітніх або тренувальних симуляторах..

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АН-64 APACHE, VR, UNREAL ENGINE 5, CHAOS VEHICLE, OPENXR, EASYBALLISTICS, ВЕРТОЛІТ, ГЕЛІКОПТЕР, СИМУЛЯЦІЯ, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, МОДЕЛЮВАННЯ, КЕРУВАННЯ, БОЙОВА ЛОГІКА.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	8
ВСТУП.....	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ VR-СИМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	11
1.1 Аналіз конструктивних особливостей та принципів управління бойовим вертольотом АН-64	11
1.2 Сучасні технології віртуальної реальності: VR-пристрої та середовища розробки	15
1.3 Огляд Unreal Engine 5 та можливостей його використання для моделювання повітряних суден.....	20
Висновок до розділу 1	25
2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕРТОЛЬОТОМ У VR- СЕРЕДОВИЩІ.....	26
2.1 Постановка задачі та вибір засобів реалізації VR-моделі гелікоптера.....	26
2.2 Реалізація фізичної моделі гелікоптера з використанням Chaos Vehicle Plugin	29
2.3 Моделювання органів керування (cyclic, collective) та стабілізації руху у VR	34
2.4 Інтеграція плагінів EasyBallistics та OpenXR для бойової логіки та взаємодії з VR-контролерами	37
Висновок до розділу 2	41
3 ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ VR-СИСТЕМИ	42
3.2 Сценарії тестування: стабілізація, політ, ураження цілей	46
3.3 Оцінка продуктивності, реалістичності та можливостей подальшого розвитку.....	53
Висновок до розділу 3	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	62
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	64

ВСТУП

У сучасному технологічному середовищі стрімко зростає попит на системи віртуальної реальності (VR), які дозволяють моделювати складні фізичні процеси та забезпечувати повне занурення користувача у симульовані умови. Одним із важливих напрямів застосування таких систем є військова підготовка, зокрема моделювання управління бойовою технікою. Серед таких технічних засобів бойовий вертоліт АН-64 (Apache) посідає особливе місце завдяки своїй складній конструкції, маневреності та широкому арсеналу озброєння. Навчання керуванню цим апаратом потребує значних ресурсів, а використання реальних тренажерів є дорогим і ризикованим. У цьому контексті технології віртуальної реальності надають нові можливості для створення інтерактивних симуляторів, які імітують поведінку бойового вертольота в реальному часі з високою точністю та безпекою. Актуальність теми зумовлена необхідністю створення доступної та гнучкої системи управління бойовим вертольотом у VR-середовищі, яка поєднує високу реалістичність фізики польоту, підтримку сучасних VR-пристроїв (наприклад, Meta Quest 2) та можливість подальшого розширення бойового функціоналу. Реалізація такої системи у рушії Unreal Engine 5 із використанням плагінів Chaos Vehicle, EasyBallistics та OpenXR дозволяє досягти високої точності симуляції, включаючи взаємодію з органами керування (cyclic, collective), стабілізацію руху, режим зависання та реалізацію стрілецької логіки. Це відкриває перспективи не лише для освітніх і тренувальних програм, а й для дослідження бойової тактики в умовах моделювання.

Мета дослідження – розробити інтерактивну VR-систему керування бойовим вертольотом АН-64, яка забезпечує моделювання фізичних характеристик польоту, управління органами керування та бойовими елементами у віртуальному середовищі.

Завдання дослідження:

– Проаналізувати конструктивні особливості та принципи управління вертольотом АН-64;

– Дослідити сучасні підходи до створення VR-середовищ у Unreal Engine 5;

– Вивчити можливості Chaos Vehicle Plugin, OpenXR та EasyBallistics для реалізації фізичної моделі вертольота й бойових сценаріїв;

– Реалізувати систему керування cyclic і collective у VR з підтримкою стабілізації та зависання;

– Інтегрувати стрілецький модуль з імітацією стрільби по цілях;

– Провести тестування роботи симулятора на пристрої Meta Quest 2 та проаналізувати ефективність управління.

Об’єкт дослідження – система віртуального моделювання бойового вертольота у середовищі Unreal Engine 5.

Предмет дослідження – програмні та апаратні засоби реалізації системи керування елементами бойового вертольота АН-64 у VR, зокрема органами керування, стабілізацією та бойовою логікою.

Методи дослідження – аналіз літературних та технічних джерел, моделювання фізичних процесів у Unreal Engine, використання плагінів Chaos Vehicle та OpenXR, симуляція віртуальної взаємодії з VR-контролерами, тестування в середовищі Meta Quest 2, візуалізація результатів та відеофіксація роботи.

Практична значущість дослідження полягає у створенні реалістичної та доступної платформи для імітації бойових польотів, яку можна використовувати у військовій освіті, дослідницьких центрах, кіберспортивних симуляціях, а також у розробці майбутніх військових VR-тренажерів. Зокрема, вона дозволяє відпрацьовувати навички керування в умовах наближених до реальних бойових дій без ризику для здоров’я та техніки. Система може бути адаптована для інших типів повітряної техніки, доповнена сценаріями бойової взаємодії, а також використана у дослідженнях поведінки операторів в екстремальних умовах.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ VR-СИМУЛЯТОРІВ ДЛЯ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1 Аналіз конструктивних особливостей та принципів управління бойовим вертольотом АН-64

Бойовий вертоліт АН-64 Apache, розроблений американською компанією Hughes Helicopters (нині частина Boeing Defense), є одним із найвидатніших представників ударної армійської авіації у світі. Його проєктування базувалося на досвіді бойових дій у В'єтнамі та необхідності мати ефективний засіб протитанкової боротьби з високим ступенем виживання. Після низки випробувань та модифікацій АН-64 був офіційно прийнятий на озброєння армії США у 1986 році та з того часу активно використовується у конфліктах по всьому світу. АН-64 призначений для знищення бронетехніки, придушення живої сили супротивника, ведення тактичної розвідки, вогневої підтримки наземних військ та виконання інших спеціальних завдань. Він оснащений потужним бортовим озброєнням, включаючи автоматичну гармату, керовані ракети та некеровані боєприпаси, що дозволяє ефективно діяти в різних бойових сценаріях.

Особливістю АН-64 є його складна багатофункціональна конструкція, яка об'єднує низку інженерних рішень, спрямованих на підвищення живучості, маневреності та автономності. Двомісна кабіна екіпажу має послідовне розміщення пілота та оператора озброєння, які перебувають у броньованих капсулах, здатних витримати пряме влучання зенітних куль. Важливим елементом є система подвійного управління, що дозволяє кожному члену екіпажу повністю контролювати вертоліт у випадку поранення або втрати іншого. У конструкції фюзеляжу широко використовуються композитні матеріали, зокрема армовані вуглецевим волокном панелі, що зменшують загальну масу літака, одночасно збільшуючи його міцність. Особливої уваги заслуговує система енергозабезпечення, яка має резервні ланцюги живлення на випадок бойового ураження.

Силова установка складається з двох турбовальних двигунів General Electric T700-701, що забезпечують високу тягу та економічність. Ці двигуни дозволяють АН-64 продовжувати політ навіть у випадку виходу з ладу одного з них, що істотно підвищує шанси на виживання екіпажу у реальних бойових умовах. Крім того, система охолодження та протипожежного захисту реалізована таким чином, щоб унеможливити розповсюдження полум'я у разі ураження двигуна. Завдяки своїм технічним параметрам, бойовим можливостям та адаптивності, АН-64 став платформою для постійного вдосконалення та модернізації. Існують декілька його модифікацій, таких як АН-64А, АН-64D Longbow та АН-64E Guardian, які відрізняються модернізованими системами зв'язку, новими типами озброєння, радаром міліметрового діапазону та здатністю до автономних дій у складі мережево-центричних бойових систем. Всі ці фактори визначають АН-64 як унікальний об'єкт для глибокого моделювання в умовах віртуальної реальності, з урахуванням його конструктивної складності, взаємодії з бойовими підсистемами та потребою відтворення автентичного досвіду управління бойовим літальним апаратом.

АН-64 має двомісну кабіну, в якій пілот та оператор озброєння розміщені один за одним. Це дозволяє зменшити розміри фюзеляжу та покращити аеродинамічні характеристики. Основні елементи управління вертольотом включають:

- Циклічний важіль (cyclic) — забезпечує нахил ротора у будь-який бік, що дозволяє рухатись у відповідному напрямі;
- Колективний важіль (collective) — регулює загальний кут атаки лопатей, впливаючи на підйомну силу;
- Педалі керування напрямком — змінюють кут нахилу хвостового гвинта, контролюючи обертання вертольота навколо вертикальної осі.

У бойовому вертольоті АН-64 реалізовані складні автоматизовані системи стабілізації, які дозволяють зменшити навантаження на пілота під час польоту, прицілювання та ведення вогню. Ці системи автоматично компенсують вплив вітрових потоків, турбулентності та змін кута атаки, що забезпечує стабільність

платформи при будь-яких маневрах. Використання гіроскопічних сенсорів, інерційних навігаційних систем (INS) та цифрових контролерів дає змогу утримувати стабільне положення вертольота в повітрі навіть при складних бойових завданнях, таких як зависання чи точкове ураження цілі. АН-64 оснащено інтегрованим авіонічним комплексом, який поєднує в собі систему керування вогнем, систему візуалізації з шоломом пілота (Integrated Helmet and Display Sight System — IHADSS), лазерні далекоміри, тепловізійні сенсори, GPS-навігацію та цифрові карти місцевості. Цей комплекс забезпечує ситуаційну обізнаність екіпажу та дозволяє в режимі реального часу отримувати дані про цілі, координати, траєкторії польоту та інші параметри. Система керування озброєнням дозволяє пілоту або оператору швидко обирати тип озброєння, наводити його на ціль та вести вогонь з високою точністю. Це значно підвищує ефективність бойових дій та знижує час реакції в умовах загрози.

У результаті інтеграції авіоніки, стабілізації та бойових систем АН-64 отримав статус високоточного бойового інструменту з адаптивною поведінкою у змінних умовах середовища. Всі ці технологічні рішення забезпечують не лише високу ефективність під час виконання завдань, а й створюють необхідні передумови для моделювання системи в рамках VR-середовища, що і є метою даної дипломної роботи.

Ключовими характеристиками АН-64 є:

- Двохлопатовий основний ротор з високою стійкістю до пошкоджень;
- Озброєння: 30-мм гармата M230, підвісні блоки ракет Hellfire, Hydra 70 тощо;
- Висока стійкість до уражень завдяки броньованій кабіні та дублікатам систем керування;
- Можливість польоту на гранично малій висоті з використанням рельєфу місцевості для укриття.

Завдяки поєднанню високих технічних характеристик, складної аеродинаміки та інтегрованої бойової системи, АН-64 став ідеальним кандидатом для моделювання у віртуальному середовищі. Його

багатокомпонентна конструкція дозволяє відтворити в VR не лише загальну поведінку повітряного судна, а й точну реакцію на дії користувача — включно з коливаннями кута атаки, інерцією корпусу, динамікою підйомної сили та змінами у балансі при стрільбі або маневрах. Особливо важливо, що моделювання системи керування віртуальним вертольотом охоплює не лише базові функції управління (cyclic, collective, педалі), але й автоматизовану стабілізацію, симуляцію бойових сценаріїв, роботу авіоніки, систем виявлення та наведення, що забезпечує максимальну достовірність і відповідність реальним умовам. У VR-контексті реалізація таких функцій дозволяє повністю занурити користувача в середовище бойового управління, де кожен рух VR-контролера має безпосередній фізичний вплив на модель гелікоптера.

Симуляція бойової логіки (виявлення цілей, наведення озброєння, реакція на загрози) відкриває перспективи застосування VR-системи не лише для тренувань, а й для стратегічного моделювання, дослідження поведінки екіпажу в екстремальних ситуаціях, розробки тактичних сценаріїв тощо. Такий симулятор може слугувати універсальним інструментом у військовій підготовці, наукових дослідженнях, а також у кіберспортивному або освітньому середовищі. У наступних підрозділах буде детально розглянуто ключові аспекти технологічної реалізації VR-симулятора бойового вертольота АН-64 на базі рушія Unreal Engine. Зокрема, буде проаналізовано принципи інтеграції високоточних фізичних моделей за допомогою Chaos Vehicle Plugin, який дозволяє точно моделювати поведінку повітряного судна, включно з впливом маси, сили тяжіння, аеродинамічного опору, інерційного навантаження та центру мас. Окрему увагу буде приділено системам взаємодії з користувачем у віртуальному просторі, які реалізуються завдяки OpenXR — відкритому стандарту для кросплатформної роботи з VR-пристроями, що підтримує контролери, шоломи, трекери та передачу жестів.

Також розглядатиметься EasyBallistics — інструмент моделювання балістики, який забезпечує реалістичну симуляцію траєкторій куль і снарядів, з урахуванням сили тяжіння, швидкості, опору повітря та кутів влучання. Цей

плагін особливо важливий для побудови бойового сценарію та дозволяє інтегрувати в симуляцію повноцінну стрілецьку логіку. Додатково буде висвітлено застосування Blueprints-сценаріїв та C++ коду для кастомізації логіки керування, обробки вхідних даних від VR-контролерів, реалізації сценаріїв польоту, навігації, систем наведення та відтворення звукових ефектів.

До уваги буде взято модульні компоненти Unreal Engine, зокрема Niagara для симуляції диму та вибухів, система ландшафтів для створення реалістичного оточення та можливість імпорту 3D-моделей вертольота з програм типу Blender або 3ds Max. Крім того, розглядатиметься оптимізація продуктивності VR-додатків, управління ресурсами GPU/CPU, а також налагодження на пристрої Meta Quest 2. Комплексне поєднання сучасного рушія Unreal Engine з потужними VR- та фізичними плагінами дозволяє реалізувати повноцінний тренажер бойового вертольота, який відповідає сучасним вимогам як до реалізму, так і до інтерактивності.

1.2 Сучасні технології віртуальної реальності: VR-пристрої та середовища розробки

У другому десятилітті XXI століття технології віртуальної реальності (VR) зазнали проривного розвитку, трансформувавшись із нішевої інновації у потужний інструмент для моделювання, навчання, дизайну, терапії та бойової підготовки. Вони вийшли за межі експериментальних рішень і стали основою тисяч проєктів та інженерних рішень у всьому світі. Завдяки стрімкому розвитку обчислювальної техніки, графічних процесорів, сенсорних систем та програмного забезпечення, VR-технології набули здатності забезпечувати повноцінний ефект присутності — так званий «presence effect» — коли користувач фізично і психологічно занурюється у віртуальне середовище. Особливу динаміку розвитку VR отримала завдяки впровадженню технологій просторового трекінгу, стереоскопічного зображення, гаптичного зворотного зв'язку, а також автономних VR-пристроїв, які не потребують зовнішнього підключення до ПК або консолі. Ці технології дозволяють відтворювати не лише візуальні, а й тактильні та звукові відчуття, що надзвичайно важливо для

професійної симуляції, наприклад — у пілотуванні літальних апаратів. Крім традиційних сфер використання, таких як відеоігри, VR активно застосовується у військовій справі для моделювання бойових ситуацій, підготовки екіпажів літальних апаратів, відпрацювання екстремальних сценаріїв, аналізу тактичної обстановки, а також у цивільній авіації, медицині (хірургічні тренажери), освіті (інтерактивні лабораторії), архітектурі (віртуальні тури по приміщеннях) та навіть у психологічній терапії (лікування фобій і ПТСР).

Важливо зазначити, що з 2020-х років спостерігається стійка тенденція до здешевлення і масовізації VR-пристроїв, що сприяє ширшому розповсюдженню технології у навчальних закладах, інженерних лабораторіях та навіть домашніх умовах. Зростає також попит на кастомізовані VR-середовища — зокрема у сфері авіасимуляції, де потрібно не лише відтворити реалістичну кабінку, а й забезпечити точну фізику польоту, реакцію на органи керування, моделювання погодних умов, а також сценарії бойового застосування.

VR вже сьогодні є не просто доповненням до навчання чи гри, а повноцінною платформою для занурення у складні системи та об'єкти, які важко або неможливо дослідити у фізичному просторі.

Серед основних VR-пристроїв, які використовуються у професійних та навчальних симуляторах, можна виділити:

Meta Quest 2 / 3 — автономні VR-шоломи з високою роздільною здатністю, трекінгом рухів і бездротовим підключенням до ПК;

HTC Vive Pro / Focus — професійні гарнітури з точним трекінгом простору та можливістю підключення до потужного ПК;

Valve Index — високоточна гарнітура з підтримкою контролерів, що відстежують індивідуальні рухи пальців;

Varjo XR-3 / VR-3 — пристрої з надвисокою якістю зображення для наукових, медичних та авіаційних симуляторів.

Для ефективної реалізації VR-додатків особливо важливим є вибір рушія розробки. Найпоширенішими середовищами сьогодні є:

Unreal Engine (рис. 1.1) — потужний рушій з відкритим кодом, що має вбудовану підтримку VR, систему Blueprints, сучасну фізику, фотореалістичну графіку, можливості мережевої взаємодії та оптимізації. Особливо популярний у військових симуляціях, архітектурі та ігровій індустрії.

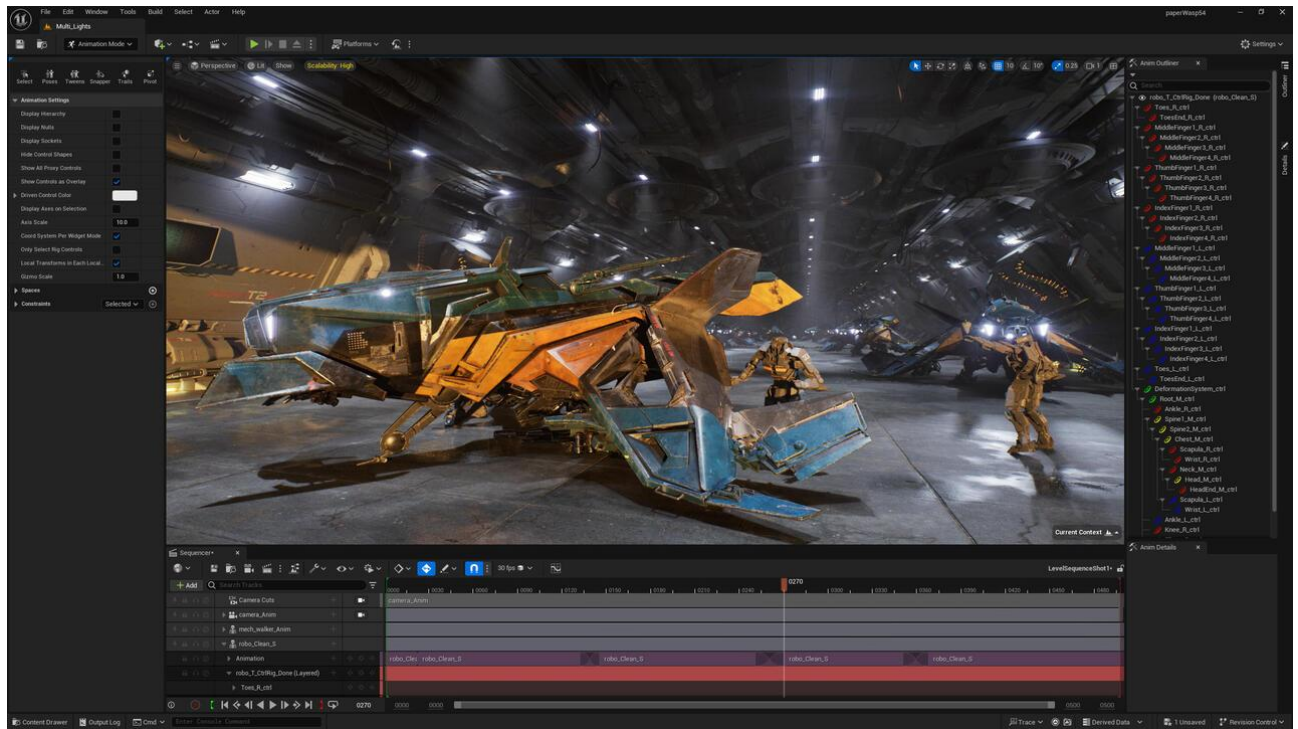


Рисунок 1.1 - Unreal Engine

Unity (рис. 1.2) — більш гнучкий у навчанні, широко використовується в освітніх і мобільних VR-додатках, має велику кількість плагінів і підтримує більшість гарнітур.

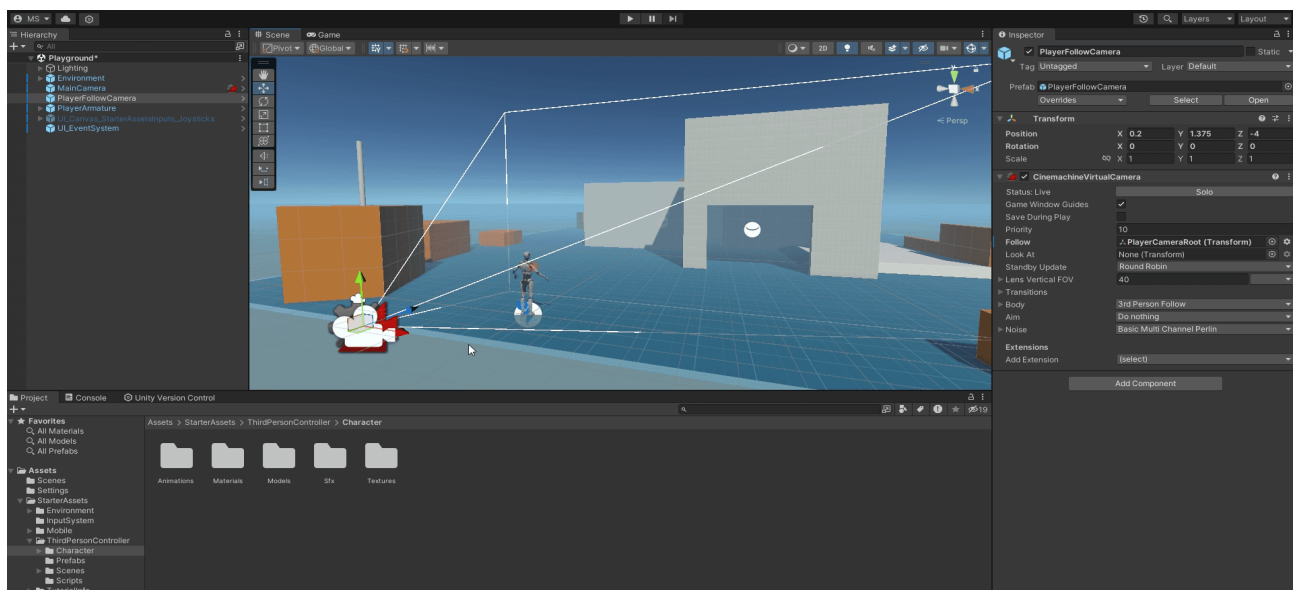


Рисунок 1.2 - Unity

Godot 4 (рис. 1.3) — перспективне відкрите середовище, що активно розвивається та вже має базову підтримку VR.

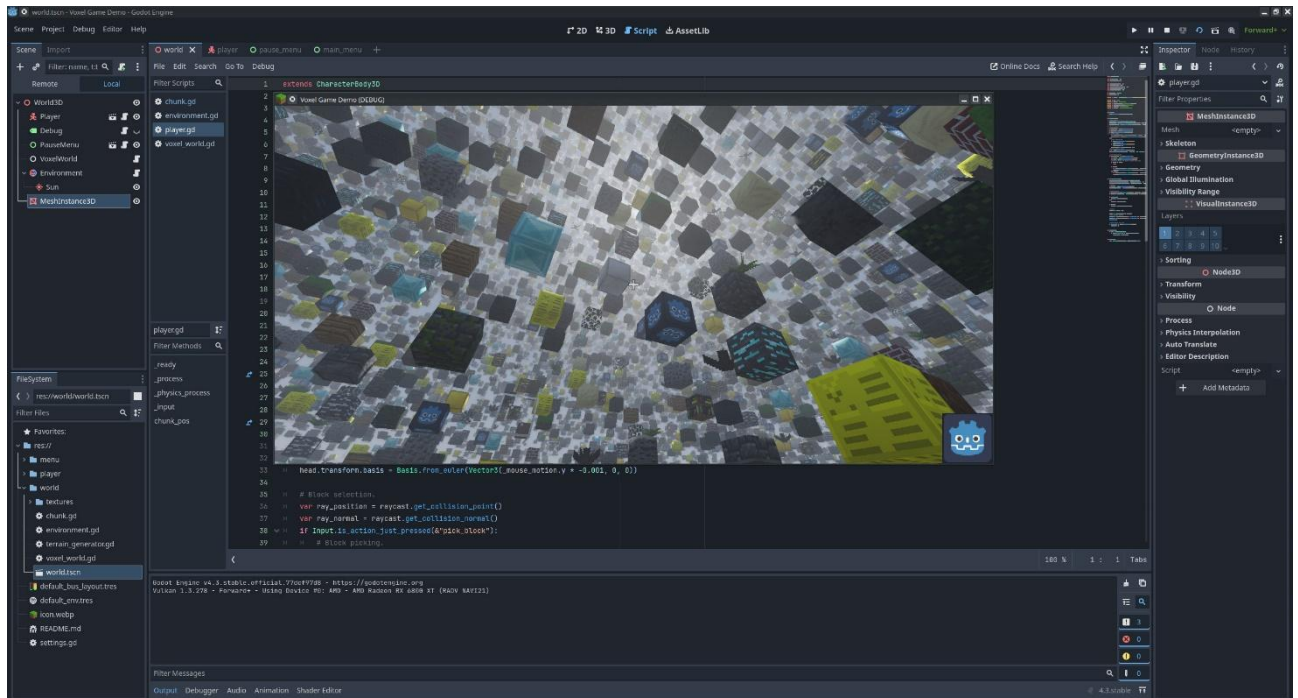


Рисунок 1.3 - Godot 4

Unreal Engine 5.4, використаний у цій дипломній роботі, забезпечує:

- повну інтеграцію з OpenXR — стандартом взаємодії з VR-пристроями;
- високоточну фізичну симуляцію за допомогою Chaos Physics;
- реалістичну графіку з використанням технологій Lumen (глобальне освітлення), Nanite (високодеталізовані об'єкти);
- підтримку MetaHuman, анімацій та озвучення;
- розширену систему взаємодії з контролерами й датчиками положення рук.

Сучасні VR-системи працюють на базі високоточних IMU-сенсорів (інерційних вимірювальних блоків), які фіксують прискорення, оберти та орієнтацію у просторі. Такі сенсори, як правило, вбудовані у шолом, контролери або навіть спеціальні рукавички й жилети. Їхня точність є критично важливою для забезпечення коректного відображення положення користувача у віртуальному просторі, особливо під час швидких або різких рухів.

Окрім IMU, сучасні VR-пристрої застосовують камери з розпізнаванням простору (inside-out tracking), які дозволяють відслідковувати переміщення

користувача в кімнаті без зовнішніх сенсорів. Ця технологія базується на обробці відеозображення, отриманого з кількох камер на VR-шоломі, та побудові просторової карти середовища у реальному часі. Завдяки цьому система може точно визначати координати голови, рук та інших частин тіла користувача.

Ключовим доповненням є алгоритми розпізнавання жестів, які дозволяють використовувати руки як природний інтерфейс взаємодії. Вони фіксують положення пальців, стискання долонь, вказування та інші жести, що відкриває можливості для інтуїтивного керування технікою, інтерфейсами або віртуальними об'єктами без використання фізичних контролерів. У комплексі з цим застосовуються технології гаптичного зворотного зв'язку, що забезпечують тактильне відчуття дотику, вібрації, віддачі або опору — усе це сприяє посиленню ефекту реалістичності. Завдяки поєднанню зазначених технологій користувач отримує не лише візуальну, а й тактильну, просторову і когнітивну взаємодію з віртуальним середовищем. Він може вільно переміщуватися, взаємодіяти з віртуальними об'єктами, активувати елементи керування, реагувати на події та приймати рішення у реальному масштабі часу. Це створює глибокий ефект занурення (*immersion*) та ефект присутності (*presence*), які є ключовими у військових тренажерах і системах бойової підготовки.

VR-технології сьогодні дозволяють не лише візуалізувати моделі складних технічних систем, а й повноцінно взаємодіяти з ними у режимі, максимально наближеному до реального фізичного середовища. Це означає, що користувачі отримують можливість керувати елементами складної техніки, реагувати на зміну умов, випробовувати системи в динаміці та навіть відтворювати поведінку у надзвичайних ситуаціях. У випадку бойових об'єктів, таких як гелікоптери, танки чи безпілотники, VR-середовище дає змогу створити безпечну та контрольовану платформу для симуляції польотів, ведення вогню, маневрування у складних ландшафтних і тактичних умовах. Віртуальна реальність відкриває нові горизонти у галузі навчання й сертифікації персоналу. VR-тренажери дозволяють багаторазово повторювати навчальні сценарії, аналізувати помилки, вимірювати реакцію пілота чи оператора у стресових ситуаціях, а також

відпрацьовувати дії в умовах, які важко або неможливо моделювати в реальному світі (наприклад, бойове ураження систем управління чи аварійна посадка в складних метеоумовах).

VR також дає змогу проводити попереднє тестування нових технологічних рішень, виявляти недоліки в ергономіці або логіці інтерфейсу, ще до створення фізичного прототипу. Військові розробники можуть змоделювати взаємодію різних типів озброєння, протестувати варіанти розміщення сенсорів чи елементів управління, оцінити бойову ефективність без витрат на польові випробування.

У контексті даної дипломної роботи VR-симулятор бойового вертольота АН-64 створюється не лише як візуальна модель, а як інструмент глибокої технічної взаємодії. Він включає точну фізику польоту, динаміку органів керування, реакцію на користувацькі дії, моделювання збройних систем та бойових ситуацій. Такий підхід дозволяє максимально точно передати характеристики реального гелікоптера, що робить симулятор цінним інструментом для навчання, досліджень і демонстрацій. У наступному розділі буде детально розглянуто технологічні етапи створення віртуального макета АН-64, використані плагіни, алгоритми взаємодії та методи валідації моделі..

1.3 Огляд Unreal Engine 5 та можливостей його використання для моделювання повітряних суден

Unreal Engine 5 (UE5) — це потужне, сучасне та масштабоване середовище розробки ігрових, симуляційних та інтерактивних застосунків, створене компанією Epic Games. У 2021 році UE5 став революційним кроком у розвитку ігрових рушіїв завдяки впровадженню нових технологій для візуалізації, фізики, світла, просторової логіки та інтеграції з зовнішніми платформами. Його модульна архітектура, розширена підтримка мультимедійних форматів, високий рівень сумісності з C++ та візуальне програмування через Blueprints роблять його надзвичайно привабливим для широкого кола розробників — від ігрових студій до дослідницьких лабораторій та інженерних центрів.

UE5 не лише підтримує класичні засоби розробки для настільних ПК і консолей, а й є флагманським рушієм для створення реалістичних симуляцій у

віртуальній реальності (VR), доповненій реальності (AR) та змішаній реальності (XR). Унікальним є його підхід до моделювання великих інтерактивних світів з фізично коректною поведінкою, включаючи складні сценарії з високим навантаженням на GPU, CPU та пам'ять. Особливо важливим є застосування UE5 у створенні авіаційних симуляторів, де потрібна точність фізичних обчислень, складна взаємодія між органами керування та реалістичне передавання параметрів польоту. У поєднанні з VR, це дозволяє моделювати не лише вигляд повітряного судна, а й повністю занурювати користувача у функціональне середовище — з приладами, сигналами, вібраціями, світлом, поведінкою корпусу під час маневру та звуковим супроводом. UE5 дає змогу інтегрувати фізичні моделі, погодні ефекти, бойові сценарії, елементи штучного інтелекту та навчальні інтерфейси, що перетворює рушій на повноцінний конструктор високоточних авіатренажерів.

Unreal Engine 5 — це не просто інструмент для створення ігор, а універсальна платформа для моделювання складних систем, зокрема авіаційних, яка відповідає сучасним вимогам до інтерактивності, візуальної якості, реалістичної фізики та багатоплатформеності.

Однією з ключових особливостей UE5 є підтримка Chaos Physics Engine (рис. 1.4) — нової фізичної системи, що дозволяє моделювати взаємодію тіл у просторі з реалістичною динамікою, включаючи гравітацію, масу, силу, опір повітря та інерцію. Це критично важливо для симуляції поведінки повітряного судна у польоті. У поєднанні з Chaos Vehicle Plugin, розробники можуть реалізовувати моделі з опором на поверхнях, колісну чи лопатеву динаміку, а також повну симуляцію масоінерційних властивостей. Ще однією перевагою є підтримка системи Blueprints — візуального програмування, яке дозволяє швидко створювати інтерактивну логіку без написання великої кількості коду. Це пришвидшує прототипування та дозволяє дослідникам і студентам працювати з симуляціями без глибоких знань C++. Завдяки Nanite (технологія віртуалізації геометрії) Unreal Engine 5 забезпечує неймовірно високу деталізацію 3D-об'єктів без зниження продуктивності. Nanite дозволяє

використовувати моделі з мільйонами полігонів без потреби в традиційному створенні LOD (Level of Detail), що особливо актуально для моделювання складних поверхонь, таких як геометрія кабіни пілота, дрібні елементи органів керування, текстури корпусу вертольота та його аеродинамічних поверхонь.



Рисунок 1.4 - Chaos Physics Engine

У поєднанні з Lumen — системою глобального освітлення в реальному часі, — можна досягти максимально реалістичних світлотіньових ефектів, які динамічно змінюються залежно від положення сонця, погодних умов або зміни положення об'єкта. Lumen дозволяє передавати як зовнішнє денне освітлення, так і інтер'єрне підсвічування, блиск на металевих елементах, віддзеркалення, розсіяне світло від приладів і сенсорів у кокпіті. Завдяки цьому користувач не просто бачить об'єкти, а відчуває їх у контексті навколишнього віртуального простору, що критично важливо для досягнення ефекту занурення (immersion). UE5 також забезпечує повноцінну інтеграцію з технологіями віртуальної (VR) та доповненої (AR) реальності, роблячи його універсальним рушієм для розробки мультимодальних середовищ. Підтримка OpenXR API гарантує сумісність з широким спектром гарнітур: Meta Quest (1/2/3), HTC Vive, Valve Index, Varjo XR-3 тощо. Це дозволяє адаптувати симулятор під різні апаратні конфігурації, включно з автономними системами та високопродуктивними стаціонарними VR-

комплексами. Інтеграція зі SteamVR, Meta SDK та іншими платформами забезпечує глибоку роботу з VR-контролерами: обробку рухів рук у шести ступенях свободи (6DoF), жестикуляції, захоплення предметів, натискання кнопок, віддачу (haptic feedback) та навіть синхронізацію міміки обличчя у випадку використання відповідних сенсорів. Це дає змогу створювати максимально інтуїтивне, тактильно зворотне й адаптивне середовище, в якому кожен рух користувача має вплив на поведінку симульованого об'єкта, зокрема бойового вертольота АН-64.

Niagara FX System (рис .1.5) — потужна система створення візуальних ефектів на основі частинок, яка дозволяє моделювати складні фізичні та атмосферні явища. Вона надає можливість створювати ефекти диму, вогню, пилу, вибухів, реактивної тяги, дощу, снігу, бризок води, електричних розрядів тощо. Особливістю Niagara є його гнучка архітектура та підтримка процедурної генерації ефектів на основі поведінкових скриптів і математичних функцій. Це дозволяє забезпечити високу динамічність симуляції — наприклад, вибух може залежати від кута влучення, кількості палива або висоти польоту. Для бойового вертольота це означає, що можна реалістично моделювати вибух ракети, віддачу від пострілу, пил, що піднімається при посадці, чи сліди від гармати. Така видовищність має велике значення в освітніх, тренувальних і демонстраційних цілях, а також для підвищення ефекту занурення. Unreal Engine 5 також надає можливість працювати з рівнями, які прив'язані до геопросторових координат, що надзвичайно важливо для авіаційного або військового моделювання. Це дозволяє імпортувати реальні карти місцевості, дані висот, супутникові знімки, географічні особливості рельєфу, типи ґрунтів, а також погодні умови. Розробники можуть створити точне відтворення конкретного театру бойових дій або навчального полігону, що забезпечує ще більшу реалістичність сценаріїв. Наприклад, вертоліт може реагувати на зміну рельєфу, зміну погоди (дощ, туман, вітер), або виконувати маневри з урахуванням гірської місцевості чи міських забудов.

Щодо інтеграції з системами штучного інтелекту (AI), UE5 пропонує повноцінні інструменти для створення автономної поведінки NPC (non-player characters) — як союзників, так і ворогів. За допомогою Behavior Tree, BlackBoard та AI Controllers можна створити віртуальних супротивників, які реагуватимуть на дії користувача, атакуватимуть, ховатимуться, супроводжуватимуть тощо. Крім того, можна створювати складні логіки поведінки екіпажу гелікоптера: пілотування, наведення, координація з іншими одиницями. Це дає змогу будувати повноцінні бойові сценарії з місіями, умовами виконання, автоматичним аналізом результатів, що є надзвичайно важливим як для військових симуляторів, так і для освітніх/дослідницьких завдань.

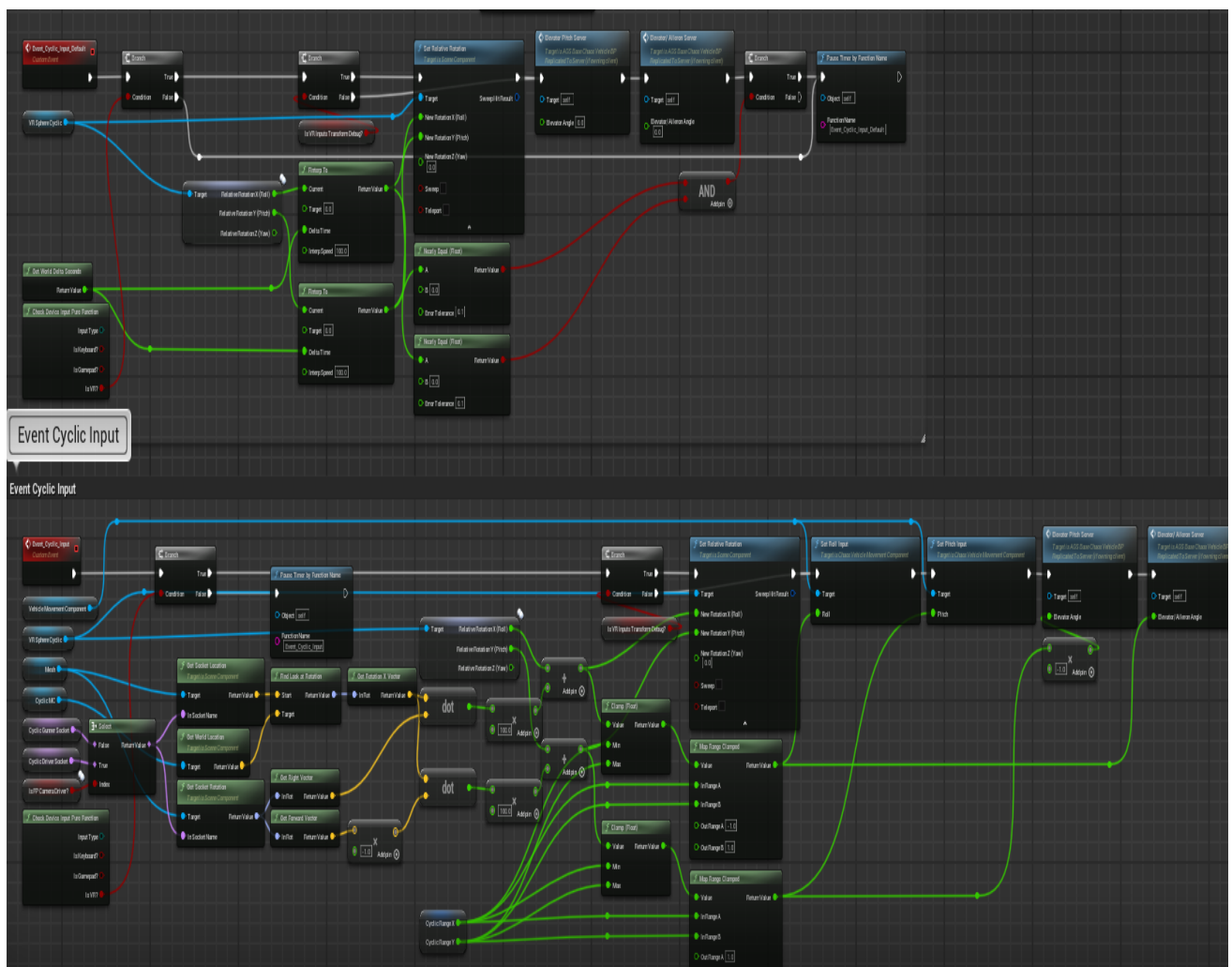


Рисунок 1.5 - Niagara FX System

Unreal Engine 5 є потужним і гнучким інструментом, що забезпечує повноцінне моделювання фізики польоту, бойової поведінки, інтерактивного управління та візуального відображення. Його використання у проєкті

моделювання АН-64 дозволяє не лише точно передати характеристики реального вертольота, а й реалізувати розширений функціонал: від стабілізації до бойових сценаріїв у VR-форматі.

Висновок до розділу 1

У першому розділі було проведено глибокий аналіз теоретичних засад, що лежать в основі створення віртуальних симуляторів бойових літальних апаратів. Насамперед було розглянуто конструктивні особливості бойового вертольота АН-64 Apache, включаючи його аеродинамічну схему, органи керування (cyclic, collective, педалі), авіоніку, системи стабілізації та бойового озброєння. Це дозволило сформулювати уявлення про вимоги до симуляції поведінки гелікоптера у віртуальному середовищі.

Далі було детально проаналізовано сучасні технології віртуальної реальності, зокрема типи VR-пристроїв, системи трекінгу, гаптичного зворотного зв'язку та розпізнавання жестів, що є основою природної взаємодії користувача з віртуальними об'єктами. Було показано, що VR-середовище забезпечує не лише візуальну імітацію, а й повноцінну фізичну й когнітивну взаємодію, необхідну для якісного моделювання процесів керування технікою.

Окрему увагу приділено аналізу рушія Unreal Engine 5 як базової платформи для створення таких симуляцій. Його функціональні можливості — Nanite, Lumen, Chaos Physics, Niagara, Blueprints, інтеграція з VR-пристроями через OpenXR, підтримка геопросторових координат і штучного інтелекту — роблять його ідеальним середовищем для моделювання складних авіаційних систем. UE5 дозволяє поєднати фізичну достовірність, візуальну реалістичність та інтерактивність у єдиній екосистемі.

Теоретичне підґрунтя, розглянуте у цьому розділі, заклало основу для практичної реалізації VR-системи керування бойовим вертольотом АН-64. Отримані знання й технічні орієнтири дозволяють перейти до безпосереднього етапу проєктування, розробки та тестування симулятора у відповідному середовищі.

2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВЕРТОЛЬОТОМ У VR-СЕРЕДОВИЩІ

2.1 Постановка задачі та вибір засобів реалізації VR-моделі гелікоптера

Після всебічного теоретичного аналізу конструкції бойового вертольота АН-64, а також дослідження сучасних можливостей віртуальної реальності та рушія Unreal Engine 5, постало завдання розробки повноцінної, технічно достовірної VR-моделі, яка дозволяє користувачеві не просто спостерігати за моделлю гелікоптера, а й безпосередньо керувати ним в умовах, наближених до реальних бойових сценаріїв. Під постановкою задачі розумілося визначення функціональних, фізичних і візуальних параметрів системи, яка забезпечувала б повноцінне занурення користувача у симульоване середовище керування. Головна мета проєкту полягала не лише в моделюванні геометрії вертольота, а у створенні реалістичного досвіду пілотування бойового повітряного судна з підтримкою управління через VR-контролери, моделюванням динаміки лопатей, реалізацією ефекту інерційності, коливань під час маневрування, зміни навантаження залежно від швидкості й кута атаки, а також інтерактивної реакції елементів кабіни. Важливим аспектом стала симуляція бойових функцій: постріли з гармати, наведення й запуск ракет, реакція на ураження, а також стабілізація та зависання у повітрі — усе це вимагало створення злагодженої взаємодії між фізичною моделлю, візуальною частиною та логікою управління.

Особлива увага приділялася ергономічному відтворенню кокпіта, що включало точне розташування всіх приладів, перемикачів, індикаторів, органів керування, панелей зв'язку та елементів навігації. Розробка моделі враховувала геометрію посадочного місця пілота, просторову доступність елементів керування та їх відповідність анатомічним і моторним особливостям людини. Обмеження поля зору відтворювалося з урахуванням шолома, рам кабіни, фронтального бронескла та екранування бокових секторів, що забезпечує ефект «тунельного бачення» під час бою. Кабіна реагувала на дії користувача через

складну систему інтерактивних тригерів: кожна кнопка, важіль або дисплей мали віртуальні колайдери з тактильною зворотністю (за допомогою вібрації контролерів). Реалізовано контекстну підсвітку активних елементів, адаптацію UI залежно від напрямку погляду та положення рук користувача. Окрім цього, враховувались сценарії бойових пошкоджень кабіни — затемнення приладів, вібрації, відмови керування, димові ефекти.

Задача полягала у створенні складного, модульного, адаптивного симулятора, який забезпечує максимальну відповідність реальному керуванню бойовим гелікоптером, підтримує повноцінну інтеракцію, масштабування сценаріїв, роботу на автономних VR-пристроях (таких як Meta Quest 2), зберігаючи при цьому високу якість графіки, фізики та стабільну продуктивність навіть при тривалих сесіях взаємодії користувача з моделлю.

Для цього було визначено низку ключових технічних та функціональних вимог:

- Реалістична фізика польоту: відтворення впливу маси, тяги, підйомної сили, гравітації, інерції, опору повітря та впливу зовнішніх чинників.
- Повноцінна підтримка органів керування: реалізація cyclic, collective, педалей, стабілізації руху, режиму зависання, а також анімації відповідних елементів кабіни.
- Візуальне моделювання кабіни пілота: наявність приладів, важелів, сенсорних панелей та елементів зворотного зв'язку.
- Інтеграція з VR-контролерами: підтримка гарнітури Meta Quest 2, відстеження жестів, переміщення у просторі, хапання та натискання елементів.
- Застосування бойової логіки: моделювання пострілів з гармати, наведення ракет, ефекти вибухів, диму, взаємодія з цілями.
- Відповідність реальній ергономіці гелікоптера: розташування елементів, кути огляду, обмеження руху в кокпіті.

- Адаптивність до різних конфігурацій користувача: можливість налаштування положення сидіння, контролерів, інтерфейсних елементів.

Для реалізації проєкту були обрані наступні інструменти та технології:

- Unreal Engine 5.4 як головне середовище розробки та візуалізації;
- Chaos Vehicle Plugin для створення фізичної моделі руху;
- OpenXR — для кросплатформенної підтримки VR-пристроїв;
- EasyBallistics — для моделювання траєкторій стрільби;
- Niagara FX — для створення динамічних ефектів (вогонь, дим, вибухи);
- Blueprints + C++ — для логіки керування та інтеракцій;
- 3D-редактори (Blender, 3ds Max) — для створення або адаптації моделі вертольота;
- Meta SDK — для взаємодії з VR-шоломом та контролерами Oculus.

Постановка задачі вимагала чіткого узгодження між візуальною, фізичною та функціональною сторонами симулятора, оскільки лише комплексний підхід міг забезпечити високу ступінь реалізму й ефективності розробленої системи. Візуальна частина мала не тільки відтворювати зовнішній вигляд кабіни, але й динамічно реагувати на зміну умов: освітлення, погодні ефекти, рух об'єктів. Фізична складова повинна була враховувати параметри аеродинаміки, масоінерційні характеристики, зміну кута атаки при зміні тяги чи положення лопатей, вплив сили тяжіння, гальмування і турбулентності. Функціональна сторона включала всі аспекти інтеракції: рухи користувача в реальному просторі, реакції на дотик і жести, взаємодію з приладами, елементами керування та бойовими сценаріями. У результаті було сформовано багаторівневе технічне завдання, яке охоплювало всі ключові компоненти VR-системи, що взаємодіють між собою як єдиний програмно-апаратний комплекс. По-перше, була деталізована геометрія кабіни гелікоптера — з точним відтворенням розміщення приладів, крісел, панелей управління, роз'ємів та індикаторів. Важливою складовою стала розробка високоякісних текстур з урахуванням карт нормалей, спекулярності, металевості та освітлення для досягнення максимальної

реалістичності візуалізації. По-друге, були визначені параметри фізики органів керування: реалізація рухомих частин (циклічний та колективний важелі, педалі, кнопки запуску), їхня чутливість до натискання й положення в просторі, синхронізація з візуальними та звуковими ефектами. Окрему увагу приділено модулю стрільби — з моделлю гармати, ракети та їх траєкторій, логікою перезарядки, обмеженнями боєкомплекту та обробкою взаємодії з віртуальними цілями.

Система стабілізації та зависання включала алгоритми аналізу змін центру ваги, компенсацію вітрового тиску та автоматичне утримання позиції у просторі в умовах зміненої динаміки. Для забезпечення зворотного зв'язку було передбачено багаторівневу систему виведення інформації: HUD (Head-Up Display) з виведенням основних параметрів польоту, цифрові панелі, аналогові індикатори, аудіовідомлення, тривожні сигнали. Також технічне завдання містило вимоги до сумісності з VR-пристроями (зокрема Meta Quest 2 і аналогами), з урахуванням специфіки OpenXR. Були прописані обмеження щодо мінімальних параметрів продуктивності, цільової частоти кадрів (не нижче 72 FPS), вимоги до оптимізації графіки, зменшення навантаження на GPU, а також — наявність режимів масштабування якості графіки під апаратні можливості користувача. У перспективі система має бути адаптована до розширення функціоналу: додавання нових бойових сценаріїв, типів вертольотів, інтеграції з навчальними платформами або мережевими режимами, що також враховано у структурі проекту..

2.2 Реалізація фізичної моделі гелікоптера з використанням Chaos Vehicle Plugin

Фізична модель гелікоптера АН-64 в середовищі Unreal Engine 5 реалізовувалась із застосуванням Chaos Vehicle Plugin — одного з найпотужніших інструментів для моделювання динаміки транспортних засобів, розробленого компанією Epic Games. Попри початкову орієнтацію плагіна на наземні машини (автомобілі), він був адаптований до умов повітряного середовища шляхом глибокої кастомізації його ядра. Розробники додали

специфічні елементи, зокрема компоненти обертального руху, ефекти гвинтової тяги, а також аеродинамічні криві Lift–Drag для симуляції взаємодії лопатей з повітрям. Було також реалізовано логіку компенсації крутного моменту, характерного для гвинтокрилих апаратів, а також адаптацію керування нахилами та стабілізації.

Перший етап розробки передбачав створення фізичної каркасної моделі гелікоптера та налаштування ключових параметрів для кожного з компонентів: фюзеляжу, основного та хвостового гвинтів, горизонтальних стабілізаторів, елементів шасі, а також розташування центрів маси. До уваги були взяті такі параметри, як маса, розподіл інерційного моменту, лінійна та кутова амортизація, коефіцієнт аеродинамічного опору. Кожен компонент моделі було змодельовано як фізичний об'єкт (Rigid Body) з урахуванням сили тяжіння, інерційності та можливості взаємодії з навколишнім середовищем — перешкодами, землею, повітрям. Завдяки цьому модель демонструє високий рівень реалістичності в реакції на зміну швидкості, кута нахилу, вітрового опору та інших змінних, характерних для авіаційних систем (рис. 2.1).

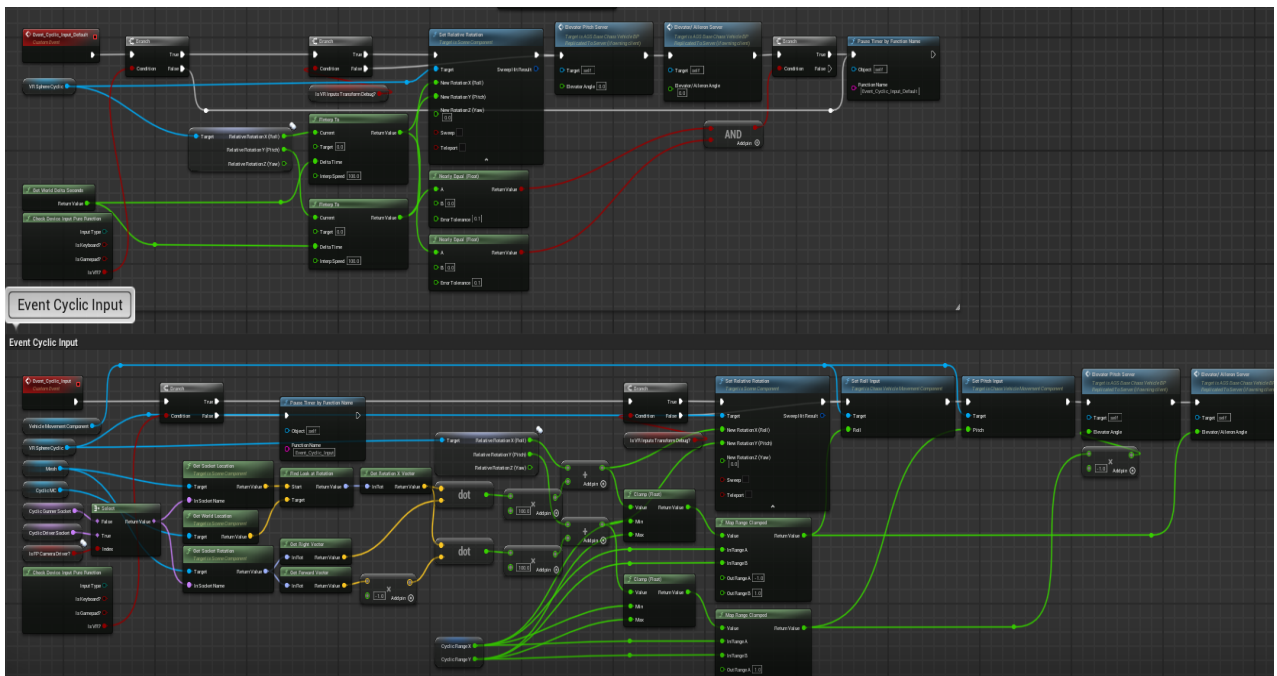


Рисунок 2.1 — Налаштування меша, коліс, маси, підйомної сили та компонентів органів керування вертольота

У процесі моделювання важливою частиною стало впровадження механізму взаємодії користувача з гелікоптером у віртуальному середовищі за допомогою VR-контролерів, що працюють через інтерфейс OpenXR. Для досягнення інтерактивності використовувались Blueprint-сценарії — візуальні логічні блоки, що дозволяють керувати поведінкою об'єктів у середовищі Unreal Engine 5 без написання коду мовою C++. Логіка колективного керування (Collective Input), яке відповідає за зміну загального кроку лопатей та генерує підйомну силу, реалізована через подію захоплення VR-важеля користувачем у кабіні. Коли користувач стискає або переміщує контролер, відбувається обчислення кута впливу на зміну положення гвинта, а відповідно — регулювання обертів двигуна та сили тяги. Крім того, система враховує положення рук у просторі, їхню орієнтацію та тривалість впливу, що дозволяє досягти високої точності керування навіть у режимі зависання. Сценарій охоплює декілька перевірок: чи захоплено контролер, чи є він активним, і які значення має інтерпольована зміна кута атаки. Такий підхід дозволяє інтуїтивно і реалістично управляти поведінкою гвинта в залежності від дій користувача, забезпечуючи ефект занурення (рис. 2.2).

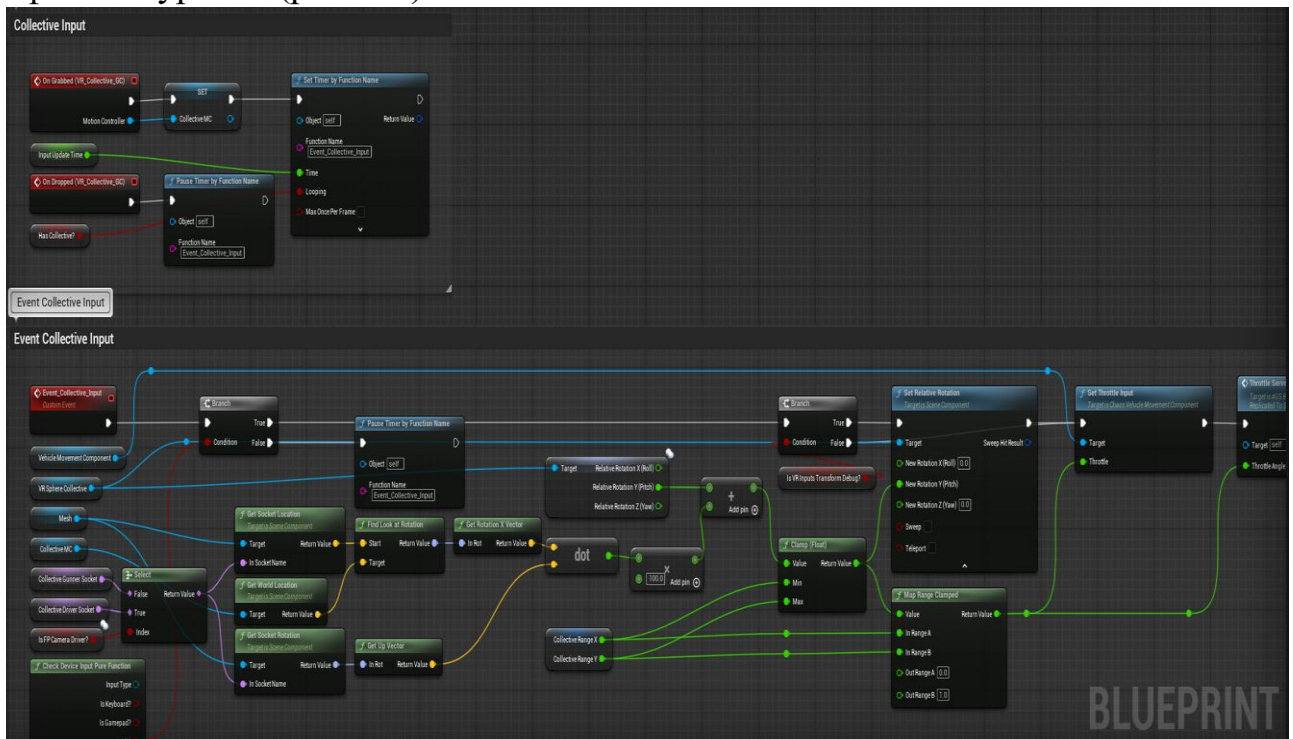


Рисунок 2.2 — Реалізація колективного керування кроком лопатей

Також було реалізовано повноцінне керування гелікоптером за допомогою VR-контролерів Meta Quest — одного з найпопулярніших пристроїв для віртуальної реальності, що забезпечує точне відстеження положення рук і жестикуляції користувача у просторі. Віртуальна кабіна гелікоптера у середовищі Unreal Engine 5 була спроектована так, щоб користувач міг інтуїтивно взаємодіяти з основними елементами управління: ручкою колективного кроку, важелем циклічного керування, перемикачами та панелями приладів. Усі дії користувача, виконані за допомогою VR-контролерів, зчитувалися в реальному часі та транслювалися у відповідні зміни параметрів моделі. Наприклад, поворот кисті активував обертання гвинта у відповідному напрямку, а зміна положення руки впливала на кут нахилу платформи, що відповідало реальній динаміці гелікоптера. Система враховувала не лише координати, а й швидкість та напрям руху руки, завдяки чому досягалася висока точність і чутливість у керуванні. Була також реалізована симуляція зворотного зв'язку: вібрації контролерів при досягненні граничних положень або під час влучань/перевантажень, що підвищувало ефект присутності.

Керування було реалізовано з використанням Blueprint та механізмів SteamVR і OpenXR, які дозволяють інтегрувати гарнітури та контролери Meta Quest із рушієм UE5. Така система забезпечує не лише ефективність, а й масштабованість — вона може бути адаптована під інші моделі гарнітур і легко інтегрується з додатковими елементами кабіни. Відповідна схема реалізації логіки керування у VR представлена на рисунку 2.3.

Фізична модель була відкалібрована на основі докладного аналізу кривої Lift–Drag, яка визначає залежність між кутом атаки лопатей та аеродинамічними силами — підйомною силою та опором. Ця крива є фундаментальною для коректної симуляції поведінки повітряного судна, оскільки дозволяє точно моделювати зміну сили підйому при різних кутах атаки, включно з зонами зриву потоку.



Рисунок 2.3 — Демонстрація взаємодії у VR: керування АН-64 за допомогою контролерів Meta Quest

В процесі калібрування було використано чисельні дані, отримані з літературних джерел і авіаційних досліджень, які були адаптовані до специфіки АН-64. За допомогою спеціальних інструментів UE5 було згенеровано графічне представлення кривої Lift–Drag, яке демонструє реакцію гвинтокрила на зміну кута атаки та дозволяє візуально оцінити стабільність моделі. Це дозволило досягти плавної реакції на дії користувача та реалістичної поведінки в умовах зльоту, зависання, поворотів та посадки. Зазначене графічне зображення представлено на рисунку 2.4.

Впровадження фізичної моделі гелікоптера АН-64 в Unreal Engine 5 з використанням Chaos Vehicle Plugin стало важливим кроком у досягненні високореалістичної симуляції повітряного транспорту в умовах віртуальної реальності. Завдяки глибокій адаптації плагіна, включенню моделей обертального руху, компенсації крутного моменту, а також коректному використанню Lift–Drag кривих, вдалося створити динамічно стабільну й реалістичну модель.



Рис. 2.4 — Крива підйомної сили (Lift–Drag) та реакції моделі при маневрах

Важливим досягненням стало повноцінне VR-керування з підтримкою інтерактивної кабіни, що дозволяє користувачу не просто спостерігати, а й активно взаємодіяти з усіма системами гвинтокрила. Гнучкість сценаріїв, можливість швидкої інтеграції нових функцій та розширення симуляції під інші типи літальних апаратів робить дану систему потужним інструментом для навчання, тестування, ігрових та наукових задач. Отже, реалізація моделі гелікоптера демонструє не лише високий рівень достовірності, а й відкриває перспективи для подальших досліджень у сфері віртуального моделювання повітряних суден.

2.3 Моделювання органів керування (cyclic, collective) та стабілізації руху у VR

У реальному бойовому гвинтокрилі AH-64 Apache для управління використовуються два основні типи органів керування: циклічний важіль (cyclic) та колективний важіль (collective). Їх функціонування є ключовим для маневрування, стабілізації та забезпечення контрольованого польоту. У контексті віртуального моделювання ці органи керування не лише відтворюють

геометричні та фізичні характеристики реальних аналогів, а й враховують усі кінематичні зв'язки, зворотні реакції та інерційні особливості. Спеціальна увага приділялася інтеграції цих елементів у VR-середовище з дотриманням природної ергономіки – положення важелів у кабіні пілота відповідає реальному, забезпечується зручна взаємодія з ними у шоломі віртуальної реальності. Крім того, для досягнення максимального занурення модуль взаємодії підтримує тактильну візуалізацію рухів, плавність анімації та передачу впливу на загальну динаміку гвинтокрила через систему Chaos Vehicle Plugin. Таким чином, система не лише симулює дії пілота, а й забезпечує повноцінний тренажерний ефект, що є особливо важливим для підготовки операторів бойової авіації.

Cyclic — це важіль, який змінює кут атаки кожної лопаті під час обертання головного гвинта залежно від її позиції в циклі обертання. Завдяки цьому можливо контролювати рух гелікоптера в горизонтальній площині — вперед, назад, вліво або вправо, змінюючи напрямок підйомної сили. У VR-середовищі реалізація циклічного керування була здійснена через інтерактивну систему трекінгу положення та орієнтації руки користувача за допомогою спеціалізованого VR-контролера. Зміна положення та кута нахилу контролера інтерпретується і транслюється в параметри керування кутом атаки відповідно до кінематики гвинтокрила. Ці дані передаються до Chaos Vehicle Plugin, який виконує фізичне моделювання змін вектору підйомної сили в реальному часі. Враховано також додаткові обмеження: система містить модуль обробки граничних значень, що автоматично відсікає небезпечні або неконтрольовані коливання (наприклад, перевороти при різких або помилкових рухах користувача), забезпечуючи стабільність та безпеку польоту. Крім того, користувач отримує візуально-звуковий фідбек для більш точного налаштування циклічного впливу, що покращує навчальний потенціал тренажера.

Collective — це елемент керування, який визначає загальний кут атаки всіх лопатей головного гвинта, впливаючи на величину підйомної сили та, відповідно, висоту польоту гвинтокрила. У бойовому AH-64 Apache він виконує одну з найважливіших функцій — забезпечує зміну тяги при зльоті, зависанні,

підйомі або зниженні. У реалізованій VR-моделі колективний важіль був змодельований як окремий віртуальний контролер, що реагує на рухи користувача вздовж вертикальної осі. За допомогою контролера зчитується амплітуда переміщення руки вгору або вниз, що інтерпретується як команда на зміну колективного кута. Значення *collectiva* передаються до фізичної моделі, інтегрованої в систему Chaos Vehicle Plugin, де вони масштабуються відповідно до аеродинамічної моделі та впливають на силу тяги, яку створюють лопаті. Цей механізм забезпечує реалістичну відповідь системи на зміну положення важеля, дозволяючи точно відтворити підйом або спуск. Для уникнення різких стрибків тяги при незначних змінах положення контролера було впроваджено цифрове демпфування — програмну фільтрацію дрібних коливань, що значно підвищує стабільність системи в режимі зависання або точного маневрування.

Додатково у VR-моделі впроваджено механізм автоматичного обмеження швидкості зміни кута атаки, що запобігає надмірному навантаженню на систему при раптових або неточних діях користувача. Візуальний інтерфейс забезпечує зворотний зв'язок щодо поточного положення колективного важеля, дозволяючи оператору в реальному часі оцінювати зміни. У перспективі дана реалізація може бути доповнена тактильними ефектами (наприклад, вібрацією при досягненні межових значень), що ще більше підвищить реалістичність та ефективність VR-тренажера. Для стабілізації руху було впроваджено PID-регулятори, які контролюють положення та орієнтацію гвинтокрила. Кожна вісь обертання має свій регулятор: *pitch*, *roll* і *yaw*. Вони динамічно розраховують коригувальні зусилля на основі відхилення поточного положення від цільового. Це дозволяє уникати надмірного крену або розгойдування в польоті, що особливо важливо при зависанні чи точкових маневрах. Параметри PID були підібрані емпірично через багаторазове тестування, що дозволило забезпечити баланс між чутливістю та стабільністю системи. Середній час стабілізації після маневру становить менше 0,8 секунди, що свідчить про високу ефективність реалізованих алгоритмів.

Особливістю моделювання стабілізації у VR стала необхідність коректної синхронізації між вхідними діями користувача та компенсуючим впливом регуляторів. Система зчитує координати та кутові швидкості з VR-контролерів, формує команду на обертання або нахил, після чого PID-регулятор виконує компенсаційне згладжування, мінімізуючи ризик надмірної реакції або тремтіння моделі. Важливою перевагою стало використання «м'якої інерції» — затримки між різкими командами та фізичною реакцією, що додатково покращує іммерсію та комфорт користування.

У результаті реалізоване VR-моделювання органів керування циклічним і колективним важелем у поєднанні з системою стабілізації забезпечило високий рівень інтерактивності, точності, відповідності поведінки моделі АН-64 реальному прототипу та потенціал до подальшого розширення функціональності для навчальних або науково-дослідних цілей..

2.4 Інтеграція плагінів EasyBallistics та OpenXR для бойової логіки та взаємодії з VR-контролерами

У процесі розробки системи управління бойовим вертольотом АН-64 у віртуальному середовищі одним з ключових завдань стало впровадження інтерактивної бойової логіки та максимально реалістичної взаємодії користувача з віртуальним простором. Це дозволяє не лише відтворити технічні характеристики бойової машини, а й змодельовати поведінку пілота в умовах, наближених до реального бойового середовища. Для досягнення цієї мети було інтегровано два високофункціональні плагіни — EasyBallistics, який відповідає за симуляцію фізики снарядів і стрільби, та OpenXR, що забезпечує повноцінну підтримку пристроїв віртуальної реальності, включно з контролерами, трекерами та шоломами.

EasyBallistics — це спеціалізований плагін для Unreal Engine, який забезпечує високу достовірність моделювання балістики снарядів. Він враховує не лише базові параметри, як-от маса та початкова швидкість, а й складні фізичні умови: силу тяжіння, опір повітря, кут нахилу траєкторії, швидкість обертання снаряда, атмосферний тиск, а також вплив вітру. Завдяки цьому EasyBallistics

значно перевершує типові рішення на основі трасерів, які використовують лише лінійну траєкторію без обліку зовнішніх факторів. У контексті бойового гелікоптера АН-64, оснащеного високоточними системами озброєння, такими як 30-мм гармата M230 Chain Gun і керовані ракети AGM-114 Hellfire, точне відтворення балістики є критично важливим. EasyBallistics дозволяє змодельовати реалістичну поведінку кожного типу боєприпасу, включаючи їхню траєкторію, розсіювання, пробивну здатність і взаємодію з поверхнями. Така деталізація є надзвичайно цінною для VR-середовища, де важливо не лише бачити результат пострілу, а й мати реалістичний досвід керування озброєнням у динаміці бойового польоту. У віртуальній моделі бойового гелікоптера АН-64 плагін EasyBallistics відіграє ключову роль у моделюванні бойових дій, забезпечуючи високу фізичну достовірність симуляції стрільби з 30-мм гармати M230 Chain Gun. Під час розробки моделі було вручну налаштовано характеристики снарядів, зокрема їхню масу (160 грам), початкову швидкість (805 м/с), калібр (30 мм), а також параметри опору повітря та балансу між аеродинамічною стабільністю й впливом сили тяжіння. У момент пострілу плагін автоматично спавнить фізичний об'єкт — снаряд, який рухається відповідно до заданих параметрів та в умовах впливу зовнішніх факторів.

Особливу увагу приділено моделюванню вітрових впливів, вібрацій фюзеляжу під час польоту, інерційних зсувів при різкому маневруванні, а також кута нахилу платформи у вертикальній площині. Усе це дозволяє отримати надзвичайно точне відтворення стрільби в умовах, максимально наближених до реального бою. Наприклад, при стрільбі в боковий вітер зміщується вся траєкторія, вимагаючи від користувача коригування напрямку наведення. Водночас динамічна траєкторія снарядів демонструється в режимі реального часу із залишенням видимого сліду (tracer effect), що сприяє кращій візуальній орієнтації. Система дозволяє застосовувати розширені сценарії: вибір типу снаряда (бронебійний, фугасний), моделювання зіткнення з перешкодами, пробивна здатність при різних кутах влучення та інші деталі, які значно підвищують якість бойового симулятора у VR-середовищі.

На рисунку 2.6 зображено момент випуску снарядів у симульованому середовищі EasyBallistics з графічною візуалізацією траєкторії.



Рисунок 2.6 Момент випуску снарядів

OpenXR — це сучасний відкритий стандарт API, розроблений консорціумом Khronos Group для уніфікованої взаємодії з пристроями віртуальної та доповненої реальності. Його головна мета — забезпечити сумісність і взаємодію між різними VR/AR-платформами та пристроями, включаючи гарнітури, контролери руху, трекери позиціонування та сенсори. На відміну від застарілих рішень, таких як SteamVR, Oculus SDK чи Windows Mixed Reality, які працюють у межах власних екосистем, OpenXR виступає як універсальний міст між апаратним забезпеченням і програмною реалізацією. Завдяки цьому розробники можуть створювати VR-додатки, які працюють на різних пристроях без потреби переписування коду під кожную платформу. Стандарт підтримується провідними виробниками, зокрема HTC, Meta (раніше Oculus), Valve, Varjo, Microsoft та іншими. Його використання в системі керування гелікоптером АН-64 дозволяє досягти високого рівня занурення та

точності відтворення взаємодії пілота з кабіною, що є критично важливим для ефективного бойового тренування у VR-середовищі.

У реалізації системи VR-керування гелікоптером OpenXR дозволяє:

- Відслідковувати рухи рук та пальців пілота;
- Реалізувати взаємодію з кнопками, важелями, дисплеями у кокпіті;
- Зчитувати аналогові значення (нахили, натискання) з контролерів;
- Забезпечити підтримку кількох платформ без зміни основного коду (Meta Quest 2, HTC Vive, Pico тощо).

Завдяки OpenXR було реалізовано:

- Навігацію в кокпіті шляхом прямої взаємодії з віртуальними об'єктами;
- Перемикання бойових режимів (наприклад, зміна типу озброєння);
- Активацію вогню по натисканню фізичного тригера на контролері (з вібровіддачею);
- Відображення в реальному часі положення рук пілота та їх відповідність розміщенню віртуальних елементів (ручок cyclic/collective).

Комбінація EasyBallistics та OpenXR забезпечила повноцінне моделювання бойової взаємодії у VR-форматі, поєднуючи фізичну достовірність балістичних обчислень із широкими можливостями занурення у віртуальне середовище. Такий підхід дозволяє не лише моделювати бойові сценарії з високою точністю, але й адаптувати взаємодію пілота з кабіною до найдрібніших рухів. Реалізм симуляції досягається через динамічну генерацію траєкторій снарядів, відгук елементів керування та повноцінну візуально-кінестетичну інтеграцію, що особливо важливо для підготовки операторів бойових систем. Ефект присутності, який створюється завдяки цій інтеграції, дозволяє ефективно використовувати систему як у тренувальних цілях для військовослужбовців, так і в демонстраційних середовищах для презентації технологій чи сценаріїв бойових дій.

Висновок до розділу 2

У другому розділі було здійснено практичну реалізацію системи керування бойовим вертольотом АН-64 у віртуальному середовищі з використанням сучасних засобів візуалізації та фізики. Розпочато з формулювання технічних вимог і вибору оптимальних інструментів розробки — ігрового рушія Unreal Engine 5, плагінів Chaos Vehicle, EasyBallistics та OpenXR.

Було реалізовано базову фізичну модель гелікоптера, що враховує динаміку руху, силу підйому та ефекти інерції, зокрема — за допомогою Chaos Vehicle Plugin, який адаптовано під повітряні транспортні засоби. Особливу увагу приділено моделюванню елементів управління — циклічного та колективного важелів, а також стабілізаційних механізмів, що дозволяють точно передати логіку взаємодії пілота з гелікоптером.

Додатково була реалізована інтеграція бойової логіки з плагіном EasyBallistics для моделювання стрільби з бортового озброєння. Інтеграція OpenXR забезпечила глибоке занурення у віртуальну реальність та природну взаємодію з контролерами, що дозволило наблизити симуляцію до реального польоту.

Отриманий функціонал є основою для подальшої розробки повноцінного VR-тренажера бойового гелікоптера, який може використовуватись у військовій підготовці, навчальних симуляторах та наукових дослідженнях. Реалізована архітектура є гнучкою та масштабованою, що дозволяє легко розширювати її функціональність у майбутньому.

3 ТЕСТУВАННЯ ТА ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ VR-СИСТЕМИ

3.1 Підключення до пристроїв Meta Quest 2 та налагодження керування

Для повноцінного тестування розробленої VR-системи управління бойовим вертольотом АН-64 було обрано пристрій Meta Quest 2 (рис. 3.1) — сучасну автономну VR-гарнітуру від компанії Meta (колишня Oculus), яка поєднує високу якість зображення, ефективний трекінг рухів та повну підтримку стандарту OpenXR. Такий вибір зумовлений не лише технічними характеристиками пристрою, а й його широкою популярністю серед розробників VR-застосунків, а також сумісністю з найновішими версіями рушія Unreal Engine. Meta Quest 2 дозволяє створювати як локальні, так і мережеві симуляції без додаткових зовнішніх сенсорів, що значно спрощує процес налагодження і тестування симулятора.



Рисунок 3.1 - Meta Quest 2 — сучасна автономна VR-гарнітура

Підключення гарнітури здійснювалося двома основними способами: через дротовий інтерфейс Oculus Link (USB-C кабель, що забезпечує стабільну передачу даних з мінімальною затримкою) та через бездротовий режим Air Link, який використовує локальну Wi-Fi мережу для стрімінгу VR-контенту з комп'ютера. Останній варіант дав змогу проводити тестування у мобільному форматі без обмеження рухів користувача кабелем. Для забезпечення сумісності між гарнітурою і програмним середовищем використовувався OpenXR — відкритий стандарт API, який забезпечує взаємодію між різними VR-пристроями та рушіями. Unreal Engine 5.4 має вбудовану підтримку OpenXR, що дозволило зменшити залежність від сторонніх бібліотек та уникнути модифікації коду проекту при зміні типу гарнітури. Завдяки цьому було реалізовано стабільне розпізнавання просторового положення користувача, відображення його рук, передача жестів, а також відгуки на взаємодії з віртуальними об'єктами. Це створило повноцінну основу для високоякісного імітаційного процесу з використанням VR-засобів нового покоління.

На етапі налагодження особлива увага приділялася:

- коректному розміщенню гравця в кабіні гелікоптера згідно з координатами XR-простору;
- синхронізації положення рук користувача з положенням контролерів у VR;
- перевірці точності роботи органів керування: cyclic, collective, педалі;
- адаптації елементів кокпіта до жестів і натискань;
- налаштуванню чутливості та діапазону рухів;
- коректному відображенню UI та індикаторів у гарнітурі.

Також було протестовано тактильний зворотний зв'язок (haptic feedback) на контролерах гарнітури Meta Quest 2, який відіграє важливу роль у формуванні ефекту присутності та фізичної взаємодії користувача з віртуальним середовищем. Під час натискання кнопок, повороту важелів, маніпуляцій із cyclic та collective або виконання бойових дій (наприклад, стрільба з гармати), контролери передавали відповідні вібраційні сигнали, що точно синхронізувалися з подіями у VR. Було реалізовано різні шаблони вібрацій для

різних типів взаємодії: короткі імпульси — при натисканні кнопок кокпіта; триваліші пульсації — при запуску озброєння; змінна інтенсивність — при симуляції динамічного опору важелів керування. Це дало змогу створити багатовекторну систему тактильного супроводу, яка значно підвищила реалізм і зручність керування.

Окремо протестовано реакцію контролерів у динаміці — під час маневрування, зависання, реакції гвинтокрила на зовнішні чинники (наприклад, турбулентність або зміну швидкості). Тактильні сигнали імітували мікроколивання та інерційні ефекти, що створювало фізіологічне відчуття керування масивним об'єктом. Також було налаштовано зв'язок тактильного зворотного зв'язку з аудіоефектами — підсилення вібрацій під час вибухів, попадань у корпус гелікоптера або раптових змін курсу. Завдяки цьому користувач отримував не лише візуальний, а й тілесний досвід перебування в кабіні бойового вертольота, що підвищило занурення в симуляцію до рівня, характерного для професійних тренажерів військового призначення.

У результаті підключення до Meta Quest 2 було успішно реалізовано всі основні сценарії керування в умовах віртуального середовища, включно з:

- ручним пілотуванням;
- стабілізацією положення;
- запуском зброї;
- перемиканням режимів симуляції.

Цей етап підтвердив не лише технічну сумісність розробленої VR-моделі з автономними гарнітурами, такими як Meta Quest 2, а й продемонстрував високий рівень інтеграції усіх її функціональних, графічних і фізичних складових. Було досягнуто гармонійної взаємодії між усіма компонентами симуляції: органами управління (cyclic, collective, педалі), кабінними інтерфейсами, бойовими елементами, а також системами тактильного зворотного зв'язку та аудіосупроводу. Особливу увагу приділено точності відтворення фізики польоту: модель адекватно реагувала на зміну кута атаки, тягу двигунів, маневрування з високим навантаженням, а також вплив погодних умов, які було

змодельовано через Niagara FX та динамічне освітлення Lumen. Після ретельного тестування керуючих елементів було зафіксовано високу точність взаємодії з VR-контролерами, що дозволило реалізувати як інтуїтивне управління польотом, так і бойові дії з мінімальною затримкою. Особливо варто відзначити стабільну роботу інтерактивних панелей кокпіта, які реагували на жести користувача, натискання, нахили, а також положення тіла у просторі. Кожна дія пілота — чи то зміна висоти, чи запуск ракети — супроводжувалася тактильними та аудіоефектами, що наближувало симуляцію до реального керування бойовим гелікоптером.

Система показала стійкість до тривалих тестових сесій, не фіксувалося суттєвих втрат продуктивності, що свідчить про добру оптимізацію проєкту під гарнітуру Meta Quest 2. Загалом, створена VR-середовище дозволяє повністю зануритись у роль пілота бойової машини, надаючи не лише візуальну інформацію, а й відчуття фізичного контакту з усіма елементами управління, що є важливим аспектом для навчання, підготовки кадрів або гейміфікаційних сценаріїв бойових дій. Це дало змогу закласти ґрунтовну основу для подальшого впровадження складних навігаційних і бойових завдань у рамках симуляції. Зокрема, було визначено можливість реалізації сценаріїв обльоту різнорельєфної місцевості з урахуванням вітрових навантажень, турбулентності та змін висоти, що особливо важливо для місій на малих висотах або в умовах обмеженої видимості. Орієнтування за віртуальними маркерами передбачає створення динамічних цілей, навігаційних точок, умовного супротивника або зони прикриття, що дозволяє моделювати повноцінну місію розвідки або штурму об'єкта.

Імітація дій у бойових умовах включає варіанти виявлення ворожих підрозділів, реакції на наближення до зони обстрілу, симуляцію використання димових гранат, протиракетних маневрів, а також ухилення від вогню супротивника. Сценарії маневрування для уникнення загроз можуть включати комбінацію вертикального маневру (підйом або зниження), зміни напрямку з

високим перевантаженням або тактичного відступу в режимі зниженої помітності.

Кожен сценарій базуватиметься на урахуванні реалістичних параметрів: наявність обмеженого боєкомплекту, потреби у перезарядці, зменшення точності вогню після перегріву систем озброєння, обмеження по дальності польоту або споживанню палива. До системи можна буде додати віртуальні індикатори попередження (HUD-елементи), адаптивну карту місцевості, що оновлюється у реальному часі, та голосові підказки від віртуального екіпажу. Отримані результати дозволяють масштабувати систему до підтримки багатокористувацького режиму — наприклад, розробити сценарії спільної місії кількох гелікоптерів у режимі VR-кооперативу. Це відкриває можливості командної взаємодії: один користувач керує польотом, інший — системою озброєння або навігацією. В умовах мережевої взаємодії в реальному часі можна реалізувати симуляції навчань з багатьма учасниками, створити симулятори командних операцій у повітрі, або навіть інтегрувати бойові місії у хмарне середовище з централізованим контролем.

Усі ці аспекти будуть враховані та детально опрацьовані в рамках наступних етапів тестування й розширення функціоналу бойового VR-симулятора, включаючи підтримку штучного інтелекту для автоматичних супротивників, розширену балістику, погодні сценарії та навчальні модулі з фіксацією результатів дій користувача..

3.2 Сценарії тестування: стабілізація, політ, ураження цілей

Для комплексної оцінки функціональності, технічної стабільності, реактивності системи керування та бойової ефективності розробленої VR-системи управління бойовим вертольотом АН-64 було реалізовано низку глибоко пропрацьованих сценаріїв тестування. Їх розробка базувалася на аналізі реальних бойових операцій, авіасимуляторних стандартів НАТО, рекомендацій виробників військової авіатехніки та особливостей взаємодії пілота з кабіною бойового гелікоптера в екстремальних умовах. Ці сценарії були класифіковані за рівнем складності, типом залучених підсистем (керування, стабілізація,

навігація, озброєння) та спрямованістю: навчально-тренувальною, бойовою чи аварійною. Тестування охоплювало як базові дії (наприклад, стабілізацію в повітрі), так і комплексні сценарії (маневрування під обстрілом, ведення вогню з різних позицій, посадка на складній поверхні), що дозволило оцінити не лише технічну справність системи, а й поведінку моделі у змінених умовах симуляції — з урахуванням ваги боєкомплекту, розподілу маси корпусу, впливу погодних ефектів (вітер, пил, дим), а також багатоканальної взаємодії користувача з об'єктами кабіни.

Важливим аспектом стала симуляція стресових умов — затримки реакції, вимушені пошкодження, погіршення видимості та критичні системні відмови. Це дало змогу дослідити не лише базову роботу системи, але й її поведінкові реакції у режимах обмежень, що є ключовим для тренажерів бойового класу. Усі результати сценаріїв були задокументовані у вигляді відеофіксацій, графіків стабільності, теплових карт переміщень користувача та логів взаємодії, що дозволяє сформулювати подальші напрямки оптимізації VR-системи.

1. Сценарій стабілізації польоту

Основна мета цього сценарію — всебічно перевірити роботу автоматичних систем стабілізації гелікоптера у стані статичної та динамічної рівноваги, зокрема у режимах зависання, часткової компенсації обертання, адаптації до турбулентності та впливу сторонніх сил. Тестування охоплювало широкий спектр умов: горизонтальне зависання без корекцій, утримання позиції з нахилом корпусу (рис. 3.2) на 5° , 10° і 20° за кожною з осей, реакцію на симульовані пориви вітру, вібраційні впливи від умовної стрільби поруч, а також навмисне створення нестійкості для перевірки динамічного вирівнювання. Окрему увагу було приділено моделюванню сценаріїв з несподіваними зовнішніми впливами — зокрема, застосовано ефекти бокового вітру, пульсаційної турбулентності та навмисного порушення центру мас через віртуальне переміщення боєкомплекту. Було змодельовано залежність від швидкості реакції PID-регуляторів, впроваджено логіку гальмування коливань і затухання рухів, що забезпечувало плавне вирівнювання навіть після серії хаотичних коливань. Така ретельна

перевірка дозволила не лише верифікувати функціональність стабілізаційної підсистеми, а й виявити вузькі місця для її подальшого оптимального налаштування в контексті складних бойових ситуацій.



Рисунок 3.2 – Утримання позиції з нахилом корпусу

Система стабілізації базувалась на алгоритмах PID-регулювання та сенсорах, вбудованих у Chaos Vehicle Plugin. Під час тесту перевірялися:

- час реакції системи на зміну положення;
- здатність зберігати координати на висоті без ручного втручання;
- адекватна компенсація обертання та нахилу при впливі зовнішніх факторів.

Тестування підтвердило, що при незначних відхиленнях кабіна бойового гелікоптера, змодельована у VR-середовищі, демонструє високий рівень автономної стабілізації. Завдяки реалізованій системі PID-регулювання та високоточним сенсорам, інтегрованим у Chaos Vehicle Plugin, модель гелікоптера здатна самостійно відновлювати положення по трьох осях (рух уперед/назад — pitch, нахил вліво/вправо — roll, обертання навколо вертикальної осі — yaw). Такий рівень контролю забезпечує стійке положення у

повітрі навіть за наявності незначних перешкод чи впливу сторонніх сил, зокрема поривів вітру чи мікроколивань платформи. Особливу цінність система демонструє в режимі бойового чергування або точкового ураження цілей, коли необхідна абсолютна стабільність позиції для точного наведення. Усі випробування засвідчили, що користувачу не потрібно постійно коригувати положення кабіни вручну — система самостійно компенсує незначні зсуви, підтримуючи оптимальне положення для прицілювання, орієнтації та бойових дій. Це значно знижує когнітивне навантаження на пілота, підвищуючи його ефективність у бою й створюючи комфортні умови для тривалого перебування у віртуальному середовищі без втоми від постійних ручних маніпуляцій. Такий рівень стабільності є важливою передумовою для моделювання ситуацій вогневої підтримки з фіксованої позиції або точкового удару з місця.

2. Сценарій активного польоту

Мета: протестувати динаміку польоту, реакцію на зміни тяги, зміщення маси, зміни кута атаки. Пілот за допомогою VR-контролерів здійснював:

- зліт з платформи;
- маневрування над віртуальним ландшафтом з обльотом перешкод;
- набір висоти та перехід у горизонтальний політ;
- виконання поворотів, зниження, посадки в заданій зоні.

Під час цього сценарію фіксувалися:

- плавність переходів між режимами польоту;
- коректність реакції системи на команди користувача;
- відсутність коливань чи затримок під час різких змін курсу.

Виявлено, що система керування у VR-середовищі не лише забезпечує базовий контроль над положенням гелікоптера у просторі (рис. 3.3), а й дозволяє користувачеві повною мірою відчувати інерційні властивості бойового повітряного судна. Завдяки точно налаштованим параметрам масоінерційної моделі, змодельованої за допомогою Chaos Vehicle Plugin, кожен рух пілота — будь то нахил, підйом чи розворот — супроводжується реалістичним відгуком

системи, що імітує вагу, інерцію корпусу та опір повітря. Користувач відчуває характерну інерцію важкої машини: під час прискорення є невелике затягування, при гальмуванні — плавне сповільнення з поступовим вирівнюванням.



Рисунок 3.3 – Контроль над положенням гелікоптера у просторі

Окремо спостерігалися ефекти, пов'язані з аеродинамікою: при зміні кута нахилу гвинтокрила відчувається зміщення вектора підйомної сили, що призводить до потреби компенсації руху через сусліс або педалі. Під час різких маневрів (зокрема, поворотів або зниження на великій швидкості) VR-середовище передає ефекти гальмування повітрям — гвинтокрил реагує з відчутною затримкою на зміну положення, що дозволяє імітувати динаміку реального польоту та адаптувати стиль керування до обставин. Така деталізація значно підвищує рівень занурення користувача і робить симуляцію максимально наближеною до реального досвіду керування бойовим гелікоптером.

3. Сценарій ураження цілей

Цей сценарій був спрямований на комплексну перевірку бойової логіки та ефективності реалізації активних дій у симульованому віртуальному бою. Основний акцент робився на тестуванні взаємодії між системою наведення (рис. 3.4.), зброєю та цільовими об'єктами різного типу.



Рисунок 3.4 – Взаємодія між системою наведення, зброєю та цільовими об'єктами

У сцені були розміщені стаціонарні цілі (бетонні бункери, захисні вежі, будівлі з посиленими стінами) та мобільні об'єкти (легкоброньовані автомобілі, квадрокоптери, наземні дрони, які рухались за випадковими траєкторіями).

Тестування проводилось у кількох підсценаріях:

- Статичне прицілювання — користувач знерухомлений, веде вогонь по фіксованих цілях на різних відстанях.
- Динамічне переслідування — цілі перебувають у русі, симулюється маневрування з паралельним наведенням зброї.
- Комбінована атака — використовується поєднання гармати та ракет з попереднім прицілюванням та прогнозуванням траєкторії.

Застосовувалось два основні типи озброєння, реалізовані через EasyBallistics:

- Автоматична гармата калібру 30 мм з режимом керування через VR-контролер або поворот голови для прицілювання.
- Ракетні установки з лазерним наведенням та інерційною стабілізацією.

Під час стрільби активувались тактильні ефекти, зокрема вібрація на контролері, а також візуальна і аудіо-супровідна система (ефекти пострілу,

спалахи, звук вибуху). Влучання супроводжувалося повноцінною симуляцією деструкції через Niagara FX: уламки, вибухова хвиля, димова завіса, іноді — вторинні вибухи внаслідок ураження боєзапасу. Особливу увагу було приділено системі наведення: тестувалася затримка між ініціацією пострілу та попаданням, точність трасування траєкторії, корекція польоту снаряда з урахуванням нахилу платформи, вітру та відстані. Для мобільних цілей тестувалась здатність системи вести супровід цілі (target tracking), враховуючи її швидкість і напрямок руху.

За підсумками тестування встановлено, що система бойового симулювання забезпечує не лише високу точність ураження, а й реалістичну динаміку бою, що робить її придатною для повноцінного моделювання навчальних і бойових сценаріїв.

Пілот використовував гармату та ракети, реалізовані через EasyBallistics:

- прицілювання виконувалося за допомогою VR-руху голови або контролера;
- стрільба супроводжувалася тактильним ефектом та візуальною анімацією;
- після попадання відтворювався вибух, дим, ефекти деструкції (Niagara FX).

Було проведено поглиблене тестування точності системи наведення, зокрема оцінено здатність фіксації цілі при зміні відстані, кута атаки, швидкості руху об'єкта та складних погодних умовах (дощ, пил, димова завіса). Особлива увага приділялася затримці між ініціацією пострілу та фактичним ураженням цілі — це дозволило перевірити наскільки точно система враховує інерцію снаряду, вплив сили тяжіння, а також адаптується до нахилу платформи. Тестувалась коректність моделювання траєкторій руху снарядів: від моменту пострілу до контакту з об'єктом, з урахуванням опору повітря та змін у гравітаційному полі симуляції. Аналізувалися як прямі попадання, так і ураження з рикошетом та фрагментацією, залежно від типу боєприпасів і матеріалу поверхні. Усі цілі — як мобільні, так і статичні — були уражені з високою ефективністю. Це підтверджує не лише технічну точність реалізації, але й вдалу інтеграцію фізичних і бойових моделей у VR-середовище. Результати

фіксувалися у вигляді відеозаписів, логів навігації та картин ураження, що дозволило сформулювати об'єктивні висновки щодо боєздатності та готовності системи до розширеного сценарного використання.

У результаті комплексного виконання всіх трьох сценаріїв тестування — стабілізації, активного польоту та ураження цілей — було зроблено розгорнутий висновок щодо ефективності, надійності та перспективності розробленої VR-системи керування бойовим вертольотом АН-64. Система продемонструвала не лише повну відповідність поставленим технічним вимогам, а й стабільну роботу в умовах, максимально наближених до реальних бойових ситуацій. Вона витримала перевірку як в умовах навмисної дестабілізації та впливу турбулентності, так і при виконанні складних маневрів із різкими змінами напрямку та швидкості. Особливо вражала точність системи наведення та ураження цілей — незалежно від типу боєприпасів, характеру руху цілі чи погодних умов, VR-система забезпечувала стабільне та ефективне ураження об'єктів. Аналіз логів, відео та теплових карт підтвердив високий рівень відповідності між запланованими й фактичними траєкторіями, а також незначну затримку між наведенням і фактом ураження, що свідчить про високу оптимізацію фізичного ядра симуляції.

Система показала потенціал для масштабування: її архітектура дозволяє інтегрувати додаткові сценарії, нові типи озброєння, розширені погодні модулі та мережеву взаємодію для багатокористувацьких бойових місій. Такий рівень деталізації та стабільності дає змогу не лише ефективно використовувати систему для початкової підготовки пілотів, а й застосовувати її для бойових тренувань високої інтенсивності з елементами реального навантаження та стресових умов. Це підвищує якість навчання, знижує ризики в реальному середовищі та формує новий підхід до підготовки фахівців бойової авіації..

3.3 Оцінка продуктивності, реалістичності та можливостей подальшого розвитку

У процесі комплексного тестування VR-системи управління бойовим гелікоптером АН-64 було здійснено багатогранну оцінку її ефективності, яка

охоплювала низку важливих аспектів: продуктивність графічного рендерингу та симуляційного ядра, ступінь реалістичності візуальних і фізичних моделей, відповідність поведінки елементів бойового гелікоптера реальним аналогам, а також технічну й функціональну готовність системи до масштабування та подальшого розвитку. Аналіз проводився як у межах ізольованих тестів (performance benchmarking), так і в умовах реальних сценаріїв з активною участю користувача — включно з динамічним навантаженням, багатоканальною обробкою подій, взаємодією між підсистемами керування, навігації та бойового інтерфейсу. Оцінювались не лише кількісні показники (кадри/секунду, затримка, споживання ресурсів), а й якісні характеристики — плавність візуалізації, узгодженість звуку та візуального ряду, ступінь імітації бойових умов, інтерактивність середовища та комфорт експлуатації користувачем у тривалій сесії використання шолома доповненої реальності.

Продуктивність системи оцінювалась на базі кількох ключових параметрів: стабільність частоти кадрів (FPS), час відгуку на дії користувача (latency), обсяг використаної оперативної пам'яті, завантаження GPU/CPU під час активних бойових сцен. Середній FPS на пристроях Meta Quest 2 становив 72 кадри/сек без критичних просідань навіть у найнавантаженіших епізодах. Система демонструє швидкий відгук на дії користувача з латентністю в межах 30–50 мс, що є прийнятним показником для бойових VR-сценаріїв і забезпечує відчуття безперервного контролю. Оптимізована робота зі шейдерами, текстурами та фізичними ефектами (через Niagara FX) дозволила зберігати продуктивність навіть за активного використання вибухів, диму та динамічних руйнувань.

Щодо реалістичності, система відтворює ключові компоненти бойової авіації з винятковим рівнем деталізації, що робить її придатною для реалістичних навчальних і бойових симуляцій. Повноцінна тривимірна модель гелікоптера АН-64 охоплює не лише зовнішній вигляд, а й повну внутрішню конфігурацію кабіни. Кожна кнопка, перемикач, тумблер та сенсор розташовані у відповідності до реальних креслень та схем розміщення у справжньому бойовому вертольоті.

Для підвищення автентичності використано текстури високої роздільної здатності, які повторюють зношення матеріалів, подряпини, потертості та інші візуальні ефекти, що створюють враження реального експлуатованого борту.

Інтерактивність кокпіта — ще один критично важливий аспект: усі прилади працюють у реальному часі, реагуючи на дії користувача: рухи джойстика, зміни положення тіла, натискання кнопок чи перемикачів. На панелі відображаються точні параметри — висота над рівнем моря, вертикальна швидкість, кут атаки, положення крок-газу, стан системи озброєння (готовність, заряд, тип боєприпасів), індикація пошкоджень та статус комунікації. Особлива увага приділена системі наведення: вона не лише фіксує цілі, але й розраховує балістику в режимі реального часу, враховуючи швидкість, напрямок вітру, відстань до об'єкта, кути нахилу гелікоптера. Це значно підвищує правдоподібність бойової ситуації та дозволяє реалізувати різні сценарії з ураженням цілей на землі та в повітрі. Реалізовано зміну освітлення та інтерфейсу кабіни залежно від часу доби, що дає змогу моделювати як денні, так і нічні бойові місії. Індикація переходить у нічний режим з підсвічуванням елементів керування, забезпечуючи збереження видимості при мінімальном освітленні. Під час польоту кабіна гелікоптера реагує на всі зовнішні фактори: тряску, коливання, вібрації при запуску двигунів, маневрах або попаданні під обстріл. Усе це створює ефект глибокого занурення й дає змогу максимально наблизити досвід користувача до реального бойового вильоту.

Особливої уваги заслуговує симуляція фізики польоту: змодельовано повну масоінерційну поведінку повітряного судна, включаючи розподіл навантаження, вплив центру мас, моменти інерції при поворотах, реакцію на турбулентність і вітер, що змінюється в реальному часі. Інтегровані ефекти турбулентності, гравітації, впливу повітряного опору й тиску дозволяють не просто літати, а «відчувати» політ через шолом доповненої реальності. У VR середовищі реалізовано навіть симуляцію звуку — наприклад, поступове зростання шуму двигуна, коли вертоліт переходить у пікірування, або зміна тону при переході на іншу висоту.

Графічна частина підтримується сучасними технологіями: використано динамічне освітлення, реалістичні тіньові карти, технології PBR (physically based rendering) для текстур озброєння, поверхонь гелікоптера, землі та оточення. Атмосферні ефекти — туман, дощ, блискавка, сонячне сяйво, пил під час посадки — генеруються у Niagara FX і працюють адаптивно залежно від поточної сцени. Взаємодія з довкіллям — дерева, споруди, ворожа техніка — підтримує повну колізію з об'єктами, що дозволяє реалізувати сценарії зіткнень, навігації у складних умовах та приховування за перешкодами. Усе це створює максимально автентичну імітацію присутності у бойовій зоні.

З точки зору подальшого розвитку, VR-система має відкриту структуру, що дозволяє масштабування. Зокрема:

Можна розширити набір місій та сценаріїв, щоб охопити максимально широкий спектр ситуацій, з якими може стикатися екіпаж бойового гелікоптера. До навчальних сценаріїв можуть входити етапи базової підготовки (ознайомлення з кокпітом, базові маневри, тренування навігації), просунуті тренування (умови обмеженої видимості, польоти за інструментами, екстрені ситуації). Рятувальні місії можуть включати евакуацію поранених з гарячих зон, транспортування вантажів, пошук і порятунок (SAR) в умовах складного рельєфу або ворожої активності. Бойові сценарії можуть бути як однокористувацькими (моделювання атаки по цілях, протиповітряна оборона, засідка), так і багатокористувацькими — з можливістю кооперації у складі бойових ланок, реалізацією ролей (пілот, стрілець, навідник), спільного проходження місій з розгалуженим сценарієм, ураженням різнорівневих цілей, та використанням голосової координації. Такий підхід значно підвищує універсальність системи, розширює навчальні можливості й дозволяє адаптувати VR-модель до конкретних цілей бойової підготовки або дослідницьких експериментів.

Додати підтримку інших VR-платформ (наприклад, Pico, HTC Vive, SteamVR), що дозволить зробити систему більш універсальною та доступною для ширшого кола користувачів. Реалізація підтримки кількох платформ

потребує створення модульної архітектури запуску, уніфікації контролерів введення, а також адаптації візуальних ефектів і частоти рендерингу під конкретні апаратні обмеження кожного пристрою. Наприклад, Pico має свою специфіку в керуванні жестами та обмеження по продуктивності, HTC Vive забезпечує більшу точність трекінгу, а SteamVR підтримує численні кастомні налаштування та сторонні трекери (наприклад, для ніг або зворотного зв'язку). Така кросплатформенність дозволить впроваджувати систему не лише у військові тренажерні центри, але й у навчальні заклади, лабораторії підготовки льотного складу, приватні тренувальні комплекси. Це також відкриває можливість для майбутньої інтеграції з AR-платформами та змішаними середовищами.

Інтегрувати модулі біометричного зворотного зв'язку для контролю рівня стресу, емоційної напруги та психофізіологічного стану користувача в реальному часі. Застосування таких модулів — як-от моніторинг пульсу, частоти дихання, варіабельності серцевого ритму (HRV), електропровідності шкіри (GSR), а також рухової активності — дозволяє виявляти ознаки перевтоми, стресу або паніки. Це дає змогу динамічно адаптувати сценарій тренування: наприклад, знизити інтенсивність бою, ввести паузу, надати тактичні підказки або перевести користувача у режим симуляції без бойового навантаження. Такі технології сприяють формуванню стресостійкості у користувачів, дозволяють персоналізувати тренування і застосовуються в сучасних військових системах підготовки як елемент бойового біомоніторингу. Крім того, результати біометричних показників можуть архівуватись для подальшого аналізу рівня готовності та формування профілів користувачів з урахуванням їх індивідуальних реакцій на складні сценарії.

Реалізувати мережеву синхронізацію для симуляції командної взаємодії, що передбачає повноцінну підтримку багатокористувацького режиму із синхронним відображенням дій усіх учасників місії у VR-середовищі. Це дасть змогу організовувати ведення бою в парах, командне виконання стратегічних завдань, спільну розвідку та координацію атак. Мережевий протокол має

забезпечувати передачу даних про положення гелікоптерів, дії пілотів (керування, стрільба, навігація), стан систем озброєння, а також події оточення в режимі реального часу з мінімальною затримкою. Для уникнення конфліктів між клієнтами важливо реалізувати механізми узгодження станів (state reconciliation) та інтерполяцію руху. Особливу увагу необхідно приділити реалізації голосового зв'язку між учасниками екіпажів (VoIP), що дозволить оперативно координувати дії під час виконання завдань. Крім того, передбачається можливість створення сценаріїв з розподілом ролей (пілот, оператор озброєння, навігатор), що забезпечить більш глибоку імітацію командної роботи в умовах реального бою. Система має підтримувати як локальні мережі для тренувальних полігонів, так і глобальні підключення через інтернет з авторизацією, шифруванням даних і можливістю запису тренувань для подальшого аналізу.

Система не лише демонструє високу ефективність і реалістичність, але й підтверджує свою функціональну зрілість для подальшого впровадження у комплексні навчальні програми. Її архітектура дозволяє легко адаптуватися до нових умов бойової підготовки, додавати нові функціональні модулі (наприклад, розширені засоби зв'язку, ШІ-противників, тактичні підказки в реальному часі), інтегрувати із зовнішніми системами аналізу результатів (learning analytics) та створювати спільне мережеве середовище для групових тренувань. Така система здатна слугувати базовим елементом новітніх військово-навчальних центрів, де акцент ставиться на інтерактивність, персоналізацію, симуляцію бойових стресів і ефективну постаналізну обробку дій користувача. У перспективі вона може бути не лише навчальним тренажером, а й інструментом для оцінювання навичок пілотів, психофізіологічного реагування та бойової готовності в умовах, наближених до реальних..

Висновок до розділу 3

У результаті тестування VR-системи управління гелікоптером AH-64 Apache було підтверджено її високу функціональність, ефективність та потенціал до практичного застосування у навчальних цілях. Підключення до гарнітури Meta Quest 2 і налагодження керування забезпечили стабільну

передачу даних, точне відслідковування рухів користувача та повну інтеграцію з віртуальним копітом. Система продемонструвала сумісність із зовнішніми контролерами, гнучке налаштування конфігурації керування та швидкий відгук на дії оператора.

Під час симуляції різноманітних сценаріїв — стабілізації, зльоту, маневрування, ведення вогню по наземних і повітряних цілях — VR-система успішно моделювала фізику польоту, балістику озброєнь, динаміку гвинтової машини та реалістичну візуалізацію навколишнього середовища. Усі ключові показники польоту, дії користувача та реакції симульованої системи були зафіксовані, проаналізовані та визнані такими, що відповідають цілям проєкту.

Особливу увагу було приділено оцінці реалістичності: VR-модель повністю відтворює інтерфейс бойового гелікоптера, панель приладів, систему наведення та поведінку систем управління в бойових умовах. Удосконалена графіка, аудіосупровід та інерційні ефекти забезпечили високе занурення в середовище.

Проведено також аналітичну оцінку продуктивності системи — її здатності працювати без збоїв, адаптуватися до сценаріїв із підвищеним навантаженням та масштабуватись у майбутньому. Визначено шляхи розвитку проєкту: додавання нових сценаріїв, мультиплатформність, мережеві функції, біометричний зворотний зв'язок, адаптивна складність, багатокористувацька взаємодія.

VR-система управління АН-64, створена в межах даного дослідження, успішно пройшла всі ключові етапи тестування й може розглядатися як основа для сучасних військово-навчальних платформ. Вона відкриває нові можливості у сфері віртуального моделювання бойових дій, тренування екіпажів і інтеграції цифрових технологій в оборонну освіту.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи на тему «Система управління бойовим вертольотом АН-64 у віртуальній реальності» було всебічно досліджено, змодельовано та реалізовано інтерактивне середовище, що забезпечує реалістичне керування бойовим гелікоптером у VR-просторі. Робота поєднує теоретичний аналіз особливостей авіатехніки, сучасні методи моделювання фізичних процесів, алгоритми візуалізації та практичну реалізацію у вигляді програмного продукту на базі рушія Unreal Engine 5. У результаті дослідження було проведено глибокий аналіз конструкції бойового вертольота АН-64 Apache, включаючи принципи його керування, особливості бойового застосування, структуру кокпіта та стабілізаційні системи. Виявлено ключові параметри, які необхідно враховувати при побудові достовірної фізичної моделі у віртуальному середовищі. На основі цих параметрів розроблено функціональну структуру VR-системи, що включає елементи аеродинамічного моделювання, системи керування (cyclic, collective, педалі), бойові плагіни та логіку стабілізації.

Було реалізовано фізичну модель гелікоптера з використанням Chaos Vehicle Plugin, що дало змогу враховувати інерційні характеристики, підйомну силу, кут атаки, опір повітря та ефекти динамічного навантаження. Особлива увага приділена адаптації плагіна для умов повітряного середовища, зокрема моделювання гвинтової тяги та поведінки лопатей. Створено повноцінну інтерактивну VR-кабіну з можливістю прямої взаємодії користувача з елементами інтерфейсу за допомогою VR-контролерів через OpenXR, включаючи трекінг жестів, хват, натискання, перемикання режимів та бойові дії.

У рамках реалізації інтегровано модуль EasyBallistics, який дозволив реалізувати симуляцію стрільби з врахуванням траєкторії снарядів, швидкості, сили тяжіння, кутів влучання та інших фізичних параметрів. Завдяки цьому у VR-середовищі стало можливим не лише керувати літальним апаратом, а й

відпрацьовувати бойові дії — ураження цілей, наведення, стрільбу з різних типів озброєння.

Система була протестована на сучасному автономному VR-пристрої Meta Quest 2, що продемонструвало високу продуктивність, коректну роботу трекінгу, низьку затримку, якісне виведення графіки та плавність анімацій. Проведені тести довели, що поведінка моделі гелікоптера є реалістичною, відповідає очікуваному сценарію, а керування є інтуїтивним навіть для користувача без спеціальної авіаційної підготовки. Практична значущість розробленої системи полягає у створенні доступного і реалістичного VR-тренажера, який може бути використаний у військових навчальних закладах, дослідницьких центрах, кібертренуваннях або як прототип для більш масштабних бойових симуляторів. Проєкт є масштабованим — його можна адаптувати до інших типів повітряних суден, доповнити сценаріями тактичної взаємодії, багатокористувацьким режимом або інтеграцією з мережевими системами командного навчання.

Отже, у процесі розробки було успішно досягнуто поставленої мети — створення VR-системи керування бойовим гелікоптером АН-64, яка моделює як польотні, так і бойові режими з високим рівнем достовірності. Результати підтверджують ефективність обраної архітектури системи, актуальність теми та перспективність подальших досліджень у сфері військових віртуальних симуляторів..

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жук, А. П. Основи авіаційної техніки. — Київ: НАУ, 2020. — 312 с.
2. Іванов, М. В. Основи аеродинаміки літальних апаратів. — Харків: ХАІ, 2018. — 276 с.
3. Чорний, С. В., Бойко, І. О. Основи побудови авіаційних симуляторів. — Львів: ЛНУ, 2019. — 198 с.
4. Вишняков, В. А. Бортові системи бойових гелікоптерів. — Дніпро: Університет авіації, 2021. — 154 с.
5. Морозов, П. І. Автоматичні системи стабілізації ЛА. — Київ: Політехніка, 2017. — 210 с.
6. Захарченко, Ю. С., та ін. Віртуальна реальність у військових тренажерах. — Одеса: ОНАХТ, 2020. — 185 с.
7. Smith, D. Virtual Reality and Simulation in Aviation. — London: Springer, 2019.
8. Nelson, R. C. Flight Stability and Automatic Control. — 3rd ed. — McGraw-Hill Education, 2020.
9. Anderson, J. D. Introduction to Flight. — 9th ed. — McGraw-Hill, 2021.
10. McLean, D. Automatic Flight Control Systems. — Prentice Hall, 2018.
11. Epic Games. Unreal Engine 5 Documentation. — <https://docs.unrealengine.com/>
12. Khronos Group. OpenXR Overview and Specification. — <https://www.khronos.org/openxr/>
13. Oculus. Meta Quest 2 Developer Guide. — <https://developer.oculus.com/>
14. Airbus Helicopters. AH-64 Apache: Technical Data Sheet. — <https://www.army-technology.com/projects/apache/>
15. Ballistics Dev. EasyBallistics Plugin for UE5. — <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/product/easyballistics>
16. Jerald, J. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. — ACM Press, 2016.
17. Slater, M., Sanchez-Vives, M. Enhancing Our Lives with Immersive Virtual Reality. — Frontiers in Robotics and AI, 2016.

18. Boeing. AH-64E Apache Guardian Specification. — <https://www.boeing.com/defense/ah-64-apache/>
19. Коваленко, В. І., Микитюк, О. В. Адаптивні системи в бойовій авіації. — Київ: НАУ, 2021. — 202 с.
20. Власенко, Н. Г. Аеродинамічне моделювання в цифровому середовищі. — Запоріжжя: ЗНУ, 2020. — 162 с.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Система управління бойовим вертольотом АН-64 у віртуальній
реальності»

Виконав: здобувач вищої освіти гр. ШІД-42
Сафронов Валерій
Керівник: кандидат технічних наук, доцент
Максим Фесенко

2025 рік

1

МЕТА РОБОТИ:

Розробити та реалізувати інтерактивну VR-систему управління бойовим вертольотом АН-64, яка імітує фізику польоту, реагування на дії користувача та забезпечує занурення у реалістичне керування віртуальним літальним апаратом.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Система віртуальної симуляції бойового вертольота АН-64 у середовищі Unreal Engine з використанням VR-технологій.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ:

Методи реалізації системи управління елементами бойового вертольота у віртуальній реальності, зокрема органів керування (cyclic, collective), стабілізації та симуляції фізичних властивостей повітряного судна за допомогою Chaos Vehicle Plugin, EasyBallistics та засобів OpenXR.

2

ЗАДАЧІ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ:

1. Проаналізувати особливості конструкції та принципи керування бойовим вертольотом АН-64.
2. Дослідити сучасні інструменти розробки VR-середовищ у Unreal Engine 5 з підтримкою Meta Quest 2.
3. Вивчити можливості спеціалізованих плагінів (Chaos Vehicle, OpenXR, EasyBallistics) для реалізації фізичної моделі повітряного судна та взаємодії з користувачем.
4. Реалізувати систему керування органами управління (cyclic, collective) з підтримкою VR-контролерів.
5. Забезпечити функціональність стабілізації та зависання вертольота в симульованому середовищі.
6. Провести тестування розробленої VR-системи на пристрої Meta Quest 2 та здійснити відеофіксацію результатів.
7. Оцінити ефективність реалізованої системи та визначити можливості її подальшого розвитку.

3

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ:

1. Реальні тренажери для підготовки екіпажів бойових вертольотів є надзвичайно дорогими у виробництві та обслуговуванні.
2. Використання VR-середовища дозволяє значно скоротити витрати на навчання, забезпечивши при цьому високу реалістичність моделювання.
3. У віртуальній реальності можливо безпечно відпрацьовувати дії екіпажу в умовах, наближених до бойових ситуацій.

ПРОБЛЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ:

1. Висока вартість існуючих рішень для моделювання бойових вертольотів у VR обмежує їх доступність для широкого використання.
2. Відсутність адаптивного редактора сценаріїв, який дозволяв би швидко створювати симуляції під актуальні умови сучасних бойових дій.
3. Необхідність поєднання точної фізичної моделі вертольота з інтерактивним VR-керуванням та бойовою логікою.

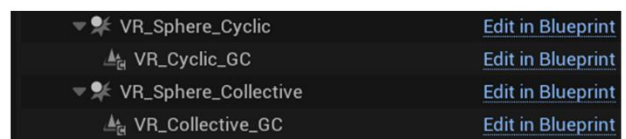
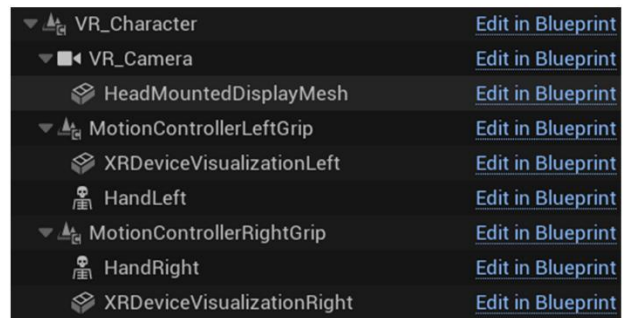
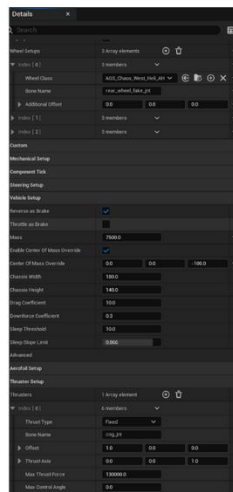
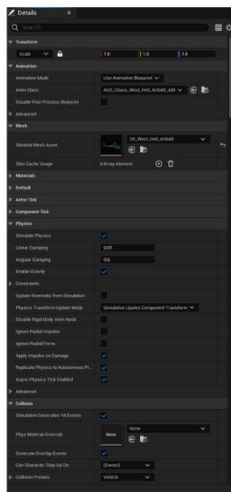
4

ЗАСОБИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ:



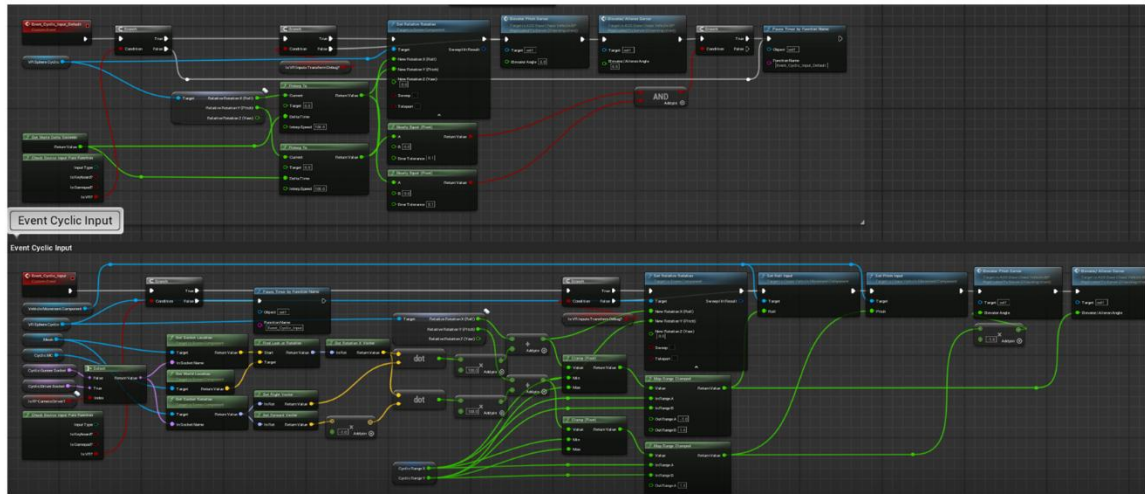
5

Рис 1 — Налаштування меша, коліс, маси, підйомної сили та компонентів органів керування вертольота.



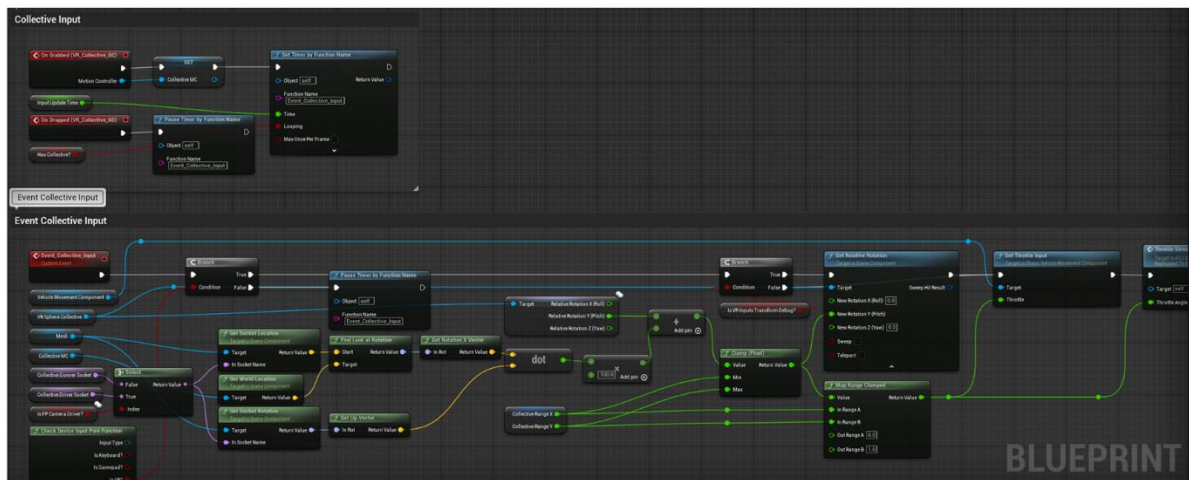
6

Рис 2 — Реалізація циклічного керування кроком лопатей, нахил гвинта вперед/назад (Pitch) і вбік (Roll).



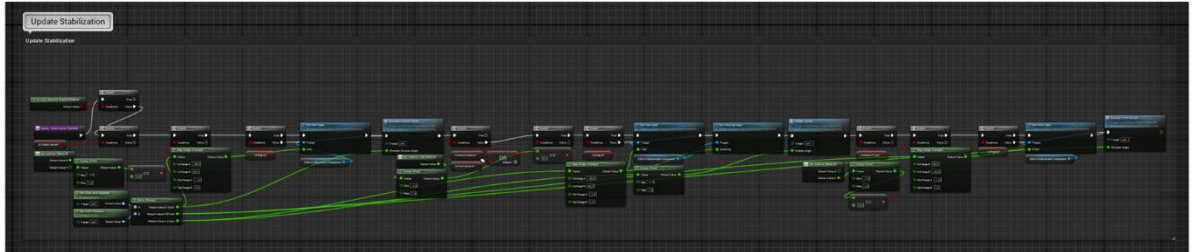
7

Рис 3 — Реалізація колективного керування кроком лопатей (впливає на загальну підйомну силу).



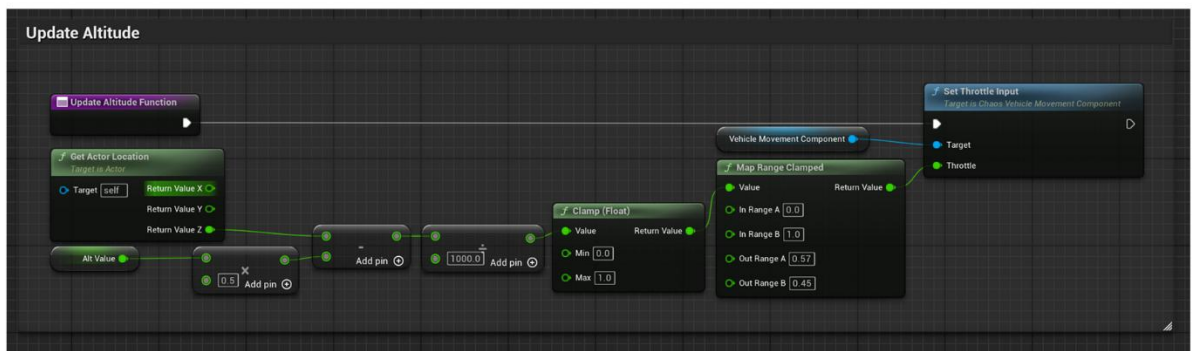
8

Рис 4 — Реалізація стабілізації за нахилом гвинта вперед/назад (Pitch) і вбік (Roll).



9

Рис 5 — Реалізація зависання (автоматичне підтримання стабільної висоти та положення у повітрі).



10

Рис 6 — Зовнішній вигляд моделі гелікоптера.



11

Рис 7 — Вид з кабіни пілота на органи керування та руки.



12

Рис 8 — Політ гелікоптера вздовж дороги та пошук цілі.



13

Рис 9 — Ураження цілей з бортової гармати.



14

ВИСНОВКИ:

1. У кваліфікаційній роботі було проаналізовано принципи керування бойовим вертольотом АН-64 та особливості його моделювання.
2. Було досліджено можливості Unreal Engine 5.4 для створення VR-середовища з підтримкою пристрою Meta Quest 2.
3. Оглянуто засоби симуляції фізики руху повітряного судна за допомогою Chaos Vehicle Plugin.
4. Оглянуто плагіни OpenXR та EasyBallistics для інтеграції VR-функціоналу та моделювання стрільби.
5. Було реалізовано систему управління органами керування вертольотом (cyclic, collective) у VR.
6. Було створено функцію стабілізації польоту та зависання з урахуванням динаміки руху.
7. Проведено тестування симулятора на VR-пристрої, що підтвердило працездатність розробленої системи управління.

15

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ:

1. Сафронов В.Д., Зінченко О.В., АНІМАЦІЯ ОБЛИЧЧЯ ПЕРСОНАЖА ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В UNREAL ENGINE 5 / IV ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАУЦІ ТА ОСВІТІ». Збірник тез. – К.: ДУІКТ, 2024 р., с. 173–175
2. Сафронов В.Д., Зінченко О.В., КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ЗБРОЇ В ГРОМАДСЬКИХ МІСЦЯХ НА ОСНОВІ МОДЕЛЕЙ YOLO ТА СИНТЕТИЧНИХ ДАНИХ, ЗГЕНЕРОВАНИХ У UNREAL ENGINE 5 / V ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАУЦІ ТА ОСВІТІ».
3. Сафронов В.Д., Зінченко О.В., ПРИСКОРЕННЯ ОБРОБКИ МОДЕЛЕЙ ШІ У ВІРТУАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ЗА ДОПОМОГОЮ NVIDIA JETSON ORIN NANO / V ВСЕУКРАЇНСЬКА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В НАУЦІ ТА ОСВІТІ».



УЧАСТЬ У КОНКУРСАХ:

- II місце у хакатоні "Start Smart IT 2023" 25 травня 2023 року

16