

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту
(повна назва)
Кафедра Інформатики
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

**ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРУ ДЛЯ
НАВЧАННЯ УПРАВЛІННЯМ FPV ДРОНОМ**
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ІНФМ-22-3

Лоточук О.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Інформатика
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Тітова О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Кобилін О.А.
(прізвище, ініціали)

2024 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інформаційно-аналітичних технологій та менеджменту
(повна назва)Кафедра Інформатики
(повна назва)Рівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 122 Комп'ютерні науки
(код і повна назва)Тип програми освітньо-професійнаОсвітня програма Інформатика
(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУстудентові Лоточуку Олексію Миколайовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)1. Тема роботи Дослідження і розробка віртуального симулятора для навчання управлінням FPV дроном

затверджена наказом по університету від 3 листопада 2023 року № 1280Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 7 січня 2023 р.3. Вихідні дані до роботи обґрунтування актуальності вибраної теми, навчальний симулятор керування FPV дроном.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1. Технології FPV дронів.

2. Розробка симуляторів з використанням Unreal Engine.

3. Розширене моделювання та програмна реалізація віртуального симулятора FPV дронів

4. Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації

5. Тестування, валідація та оптимізація симулятора.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) тестові зображення

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	03.11.2023	
2	Аналіз завдання, підбір літератури	10.11.23-12.11.23	
3	Аналіз літератури з досліджуваної проблеми	12.11.23-13.11.23	
4	Аналіз технічних засобів	14.11.23-17.11.23	
5	Розробка методів	18.12.23-22.12.23	
6	Програмна реалізація	23.12.23-27.12.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	30.12.23-03.12.23	
8	Перевірка на плагіат	05.01.2024	
9	Рецензування	06.01.2024	
10	Підготовка презентації та доповіді	07.01.2024	
11	Занесення роботи в електронний архів	16.01.2024	
12	Попередній захист кваліфікаційної роботи	16.01.2024	

Дата видачі завдання 3 листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

_____ доц. Тітова О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ/ABSTRACT

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 52 с., 40 рис., 4 дод., 17 джерел.

FPV ДРОНИ, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, СИМУЛЯЦІЯ ПОЛЬОТУ, UNREAL ENGINE, НАВЧАЛЬНИЙ СИМУЛЯТОР, АВІАЦІЙНЕ НАВЧАННЯ.

Об'єктом дослідження є процес управління FPV дроном у віртуальному середовищі.

Метою дослідження є розробка віртуального симулятора для навчання управлінням FPV дроном, з використанням передових технологій віртуальної реальності та програмної платформи Unreal Engine.

Використано методи числового моделювання, аналітичного обґрунтування, розробки інтерфейсу користувача, тестування та валідації.

У результаті дослідження здійснена програмна реалізація віртуального симулятора, який забезпечує реалістичний та інтерактивний досвід управління FPV дроном.

FPV DRONES, VIRTUAL REALITY, FLY SIMULATION, UNREAL ENGINE, BASIC SIMULATOR, AVIATION LEARNING.

The object of investigation is the process of controlling an FPV drone in a virtual environment.

The research method is the development of a virtual simulator for learning to control an FPV drone using advanced virtual reality technologies and the Unreal Engine software platform.

Methods of numerical modeling, analytical reasoning, user interface development, testing and validation were used.

As a result of the research, a software implementation of a virtual simulator has been developed, which will provide a realistic and interactive experience of controlling an FPV drone.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 Огляд основних методів	8
1.1 Технології FPV дронів.....	8
1.2 Основи віртуальних симуляцій	11
1.3 Розробка симуляторів з використанням Unreal Engine.....	13
1.4 Педагогічні аспекти навчання через симуляцію	15
1.5 Тестування та оптимізація симулятора	18
1.6 Постановка задачі дослідження	19
2 Розширене моделювання та програмна реалізація віртуального симулятора FPV дронів.....	20
2.1 Детальне математичне моделювання динаміки польоту дронів	20
2.2 Програмна реалізація симулятора у Unreal Engine	27
2.3 Аналіз даних та оптимізація симулятора	30
3 Програмна реалізація та розробка інтерфейсу	33
3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації.....	33
3.2 Розробка інтерфейсу користувача та взаємодії в симуляторі	46
3.3 Тестування, валідація та оптимізація симулятора	48
Висновки	49
Перелік ДЖЕРЕЛ посилання	50

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

FPV – First-Person View (вид від першої особи)

ESC – Electronic Speed Controllers (електронні регулятори швидкості)

PID – Proportional-Integral-Derivative (пропорційний-інтегральний-
диференційний)

VR – Virtual Reality (віртуальна реальність)

AR – Augmented Reality (доповнена реальність)

RC – Remote control (віддалене управління)

ВСТУП

У наш час FPV (First-Person View) дрони стають все більш популярними в широкому спектрі застосувань, від хобі та спортивних змагань до комерційного та наукового використання. Особливістю FPV дронів є здатність пілота бачити навколишній світ з першої особи через камеру, розташовану на дроні. Це створює унікальні можливості для пілотування, але також вимагає спеціального навчання та навичок.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є дослідження і розробка віртуального симулятора для навчання управлінням FPV дроном. Основними завданнями дослідження є: аналіз існуючих рішень у сфері симуляцій FPV дронів; проектування та реалізація інтерактивного віртуального середовища з реалістичною фізикою польоту; розробка навчальних сценаріїв та місій для користувачів; оцінка ефективності симулятора як засобу навчання та відточування навичок пілотування.

Актуальність розробки симулятора є актуальною з кількох причин. По-перше, це знижує вхідний бар'єр для нових користувачів, які бажають навчитися управляти дронами, але не мають доступу до реальних дронів або бояться ризиків, пов'язаних з їх польотами. По-друге, симулятор дозволяє створити безпечне та контрольоване середовище для навчання, де користувачі можуть експериментувати та відточувати свої навички без ризику для реального обладнання чи оточуючих.

1 ОГЛЯД ОСНОВНИХ МЕТОДІВ

1.1 Технології FPV дронів

FPV (First-Person View) дрони – це багатофункціональні аеріальні пристрої, що надають пілоту зображення з першої особи за допомогою камери, встановленої на дроні. Основні компоненти FPV дронів включають мікроконтролери, мотори, ESC, передавачі та приймачі відео, а також батареї. Ключовим аспектом в управлінні FPV дронами є відгук на команди пілота та стабілізація під час польоту, які забезпечуються за допомогою складних алгоритмів та електронних систем управління польотом. Приклад FPV дрону зображено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Приклад FPV дрону.

В останні роки, FPV (First Person View) дрони набули значної популярності, особливо в областях, де потрібна висока точність та маневреність, наприклад у військовій сфері. Їх здатність забезпечувати оператору перспективу «очима дрона» робить їх незамінними для різноманітних військових застосувань, включаючи розвідку, нагляд, та дистанційні операції. Приклад використання дрону у бойових умовах наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Використання дрону у бойових умовах.

З огляду на складність і потенційну небезпеку прямого використання дронів у бойових умовах, існує гостра потреба у високоякісному тренуванні операторів. Тут на перший план виходить розробка віртуального симулятора для навчання управлінню FPV дронами. Цей симулятор дозволяє проводити всебічне та безпечне навчання, забезпечуючи реалістичний досвід польоту без ризику для життя або дорогого обладнання [1, 2].

Симулятор може включати різні сценарії, від простого польоту в контрольованому середовищі до складних бойових місій, вимагаючи від оператора вміння швидко реагувати на змінні умови та ухвалювати стратегічні рішення. Також можлива інтеграція з реальними картографічними даними, що

дозволить операторам звикнути до реальних ландшафтів, які вони можуть зустріти на місіях [3].

Окрім того, віртуальний симулятор може включати модулі зі штучним інтелектом (рисунок 1.3), які імітують поведінку противника та непередбачувані зміни у середовищі, що надає додаткову цінність у підготовці військових фахівців. Це не тільки підвищує рівень підготовки, але й дозволяє адаптуватися до новітніх військових стратегій та технологій.



Рисунок 1.3 – Використання дрону з комп'ютерним зором.

Додатковим аспектом може бути інтеграція симулятора з системами віртуальної реальності, що забезпечує ще більшу зануреність та реалізм. Така інтеграція може включати використання VR-шоломів (рисунок 1.4), спеціалізованих керувальних панелей та інших інтерактивних елементів, що максимально наближають віртуальний досвід до реальних умов польоту та бойових операцій.



Рисунок 1.4 – Шолом-окуляри оператора FPV дрону.

1.2 Основи віртуальних симуляцій

Віртуальні симуляції створюють контрольоване середовище, в якому користувачі можуть навчатися та вдосконалювати свої навички без ризику для реальних дронів чи навколишнього середовища. Використання сучасних технологій віртуальної та доповненої реальності дозволяє створити реалістичні сценарії польоту, імітуючи різноманітні умови та виклики. Це включає моделювання погодних умов, фізичних характеристик дронів та інтерактивних елементів, що забезпечують глибоке занурення у процес навчання [4, 5].

Окрім цього, важливою перевагою віртуальних симуляцій є можливість реалізації складних сценаріїв, які в реальному світі можуть бути небезпечними або недоступними. Наприклад, симуляція польотів у важких метеорологічних умовах, таких як сильний вітер або дощ, може допомогти пілотам навчитися управляти дронами в екстремальних ситуаціях. Також можливо імітувати різні географічні ландшафти та умови, від густонаселених міст до віддалених

природних локацій, що дозволяє пілотам адаптуватися до різних сценаріїв польоту.

Важливим аспектом віртуальних симуляцій є їх гнучкість у налаштуванні параметрів та сценаріїв. Це означає, що програмне забезпечення може бути адаптоване для конкретних навчальних потреб, враховуючи рівень досвіду та специфіку завдань кожного пілота. Наприклад, для початківців можуть бути створені більш прості місії, що сприяють освоєнню базових навичок управління, тоді як для досвідчених операторів можуть бути розроблені складніші завдання, що вимагають високої точності та швидкості реакції [6].

Ще однією важливою перевагою віртуальних симуляцій є здатність збирати та аналізувати дані про польоти. Це включає відстеження успішності, помилок та покращень у навичках користувачів протягом часу. Аналіз цих даних може допомогти інструкторам ідентифікувати сильні та слабкі сторони пілотів та налаштувати програму навчання для досягнення кращих результатів.

Окрім того, віртуальні симуляції дозволяють інтегрувати теоретичні знання безпосередньо в практичне навчання. Наприклад, модулі теоретичного навчання можуть включати інформацію про аеродинаміку, метеорологію, навігацію та безпеку польотів, яка потім може бути застосована у практичних симуляціях. Це сприяє більш цілісному розумінню польотних процесів та безпеки.

Віртуальні симуляції відіграють важливу роль у стандартизації навчання пілотів. Завдяки їм можна гарантувати, що кожен пілот проходить через однаковий набір випробувань та оцінок, що забезпечує високу якість та консистентність підготовки. Це особливо важливо у сферах, де точність та надійність є ключовими, наприклад, у військових [7, 8].

Загалом, віртуальні симуляції стають незамінним інструментом у підготовці пілотів дронів, забезпечуючи безпечне, гнучке та ефективне середовище для навчання та вдосконалення навичок управління дронами.

1.3 Розробка симуляторів з використанням Unreal Engine

Unreal Engine – це передовий ігровий движок, який надає широкий спектр інструментів для розробки реалістичних симуляторів. Серед ключових переваг Unreal Engine – високоякісна графіка, підтримка складних фізичних розрахунків та зручні інструменти для створення інтерактивних іммерсивних середовищ. Ці особливості роблять Unreal Engine ідеальним вибором для створення симулятора FPV дронів, здатного імітувати реалістичні польотні характеристики та умови. На рисунку 1.5 зображено процес створювання симулятора в Unreal Engine.

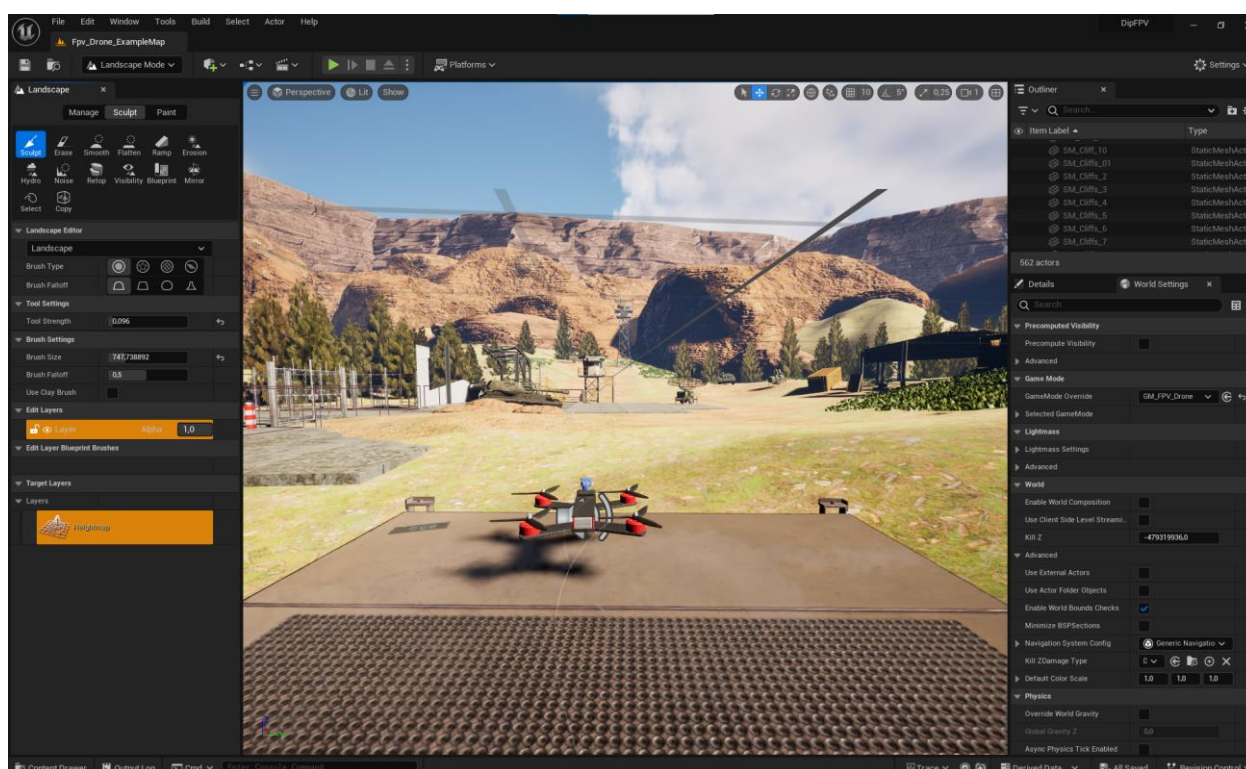


Рисунок 1.5 – Середовище розробки Unreal Engine.

Додаткові ключові елементи Unreal Engine, які забезпечують його ефективність у створенні симуляторів, включають розширену систему освітлення, яка дозволяє деталізовано відтворити різні освітлювальні умови, від яскравого сонячного світла до тьмяного заходу. Це не тільки підвищує загальну реалістичність сцен, але й дозволяє користувачам симулятора адаптуватися до різних умов освітлення, які вони можуть зустріти під час реальних польотів [9].

Система частинок та візуальних ефектів Unreal Engine дає змогу розробникам симуляторів детально відтворювати різні атмосферні явища, такі як дощ, сніг, туман чи вітер, що є важливим для імітації реальних погодних умов (рисунок 1.5). Використання цих елементів дозволяє не тільки підвищити реалізм симуляції, але й надає пілотам симуляторів можливість вчитися управлінню дроном в складних погодних умовах.

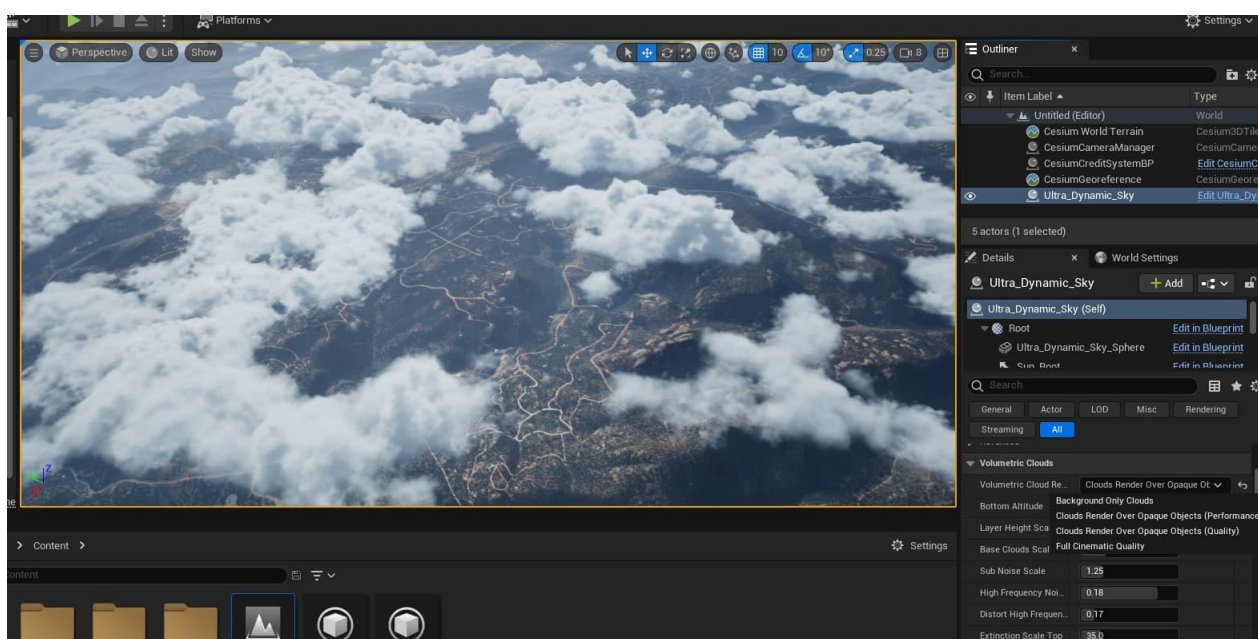


Рисунок 1.6 – Робота над погодними умовами у Unreal Engine.

Крім того, Unreal Engine підтримує розширену аудіо систему, яка дозволяє реалістично відтворювати звуки дрона та його взаємодії з оточенням. Це включає звуки двигунів, аеродинамічний шум, а також звуки зовнішнього середовища (рисунок 1.7), що збільшує іммерсію та допомагає пілотам симуляторів краще зрозуміти та відчути поведінку дрона.

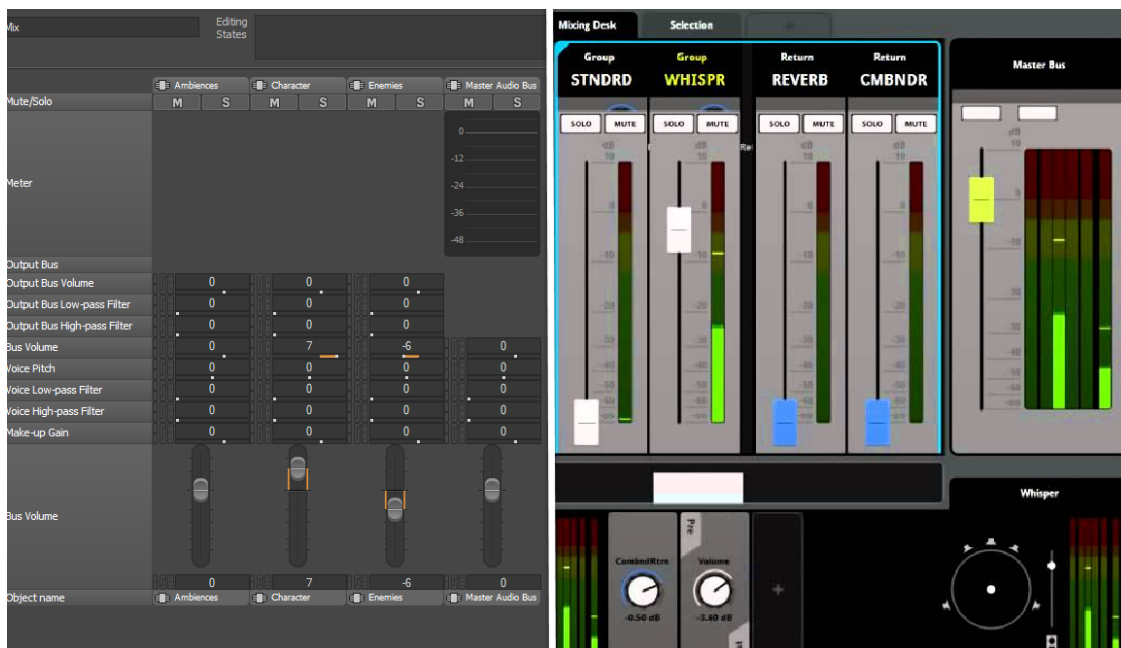


Рисунок 1.7 – Робота над звуком у Unreal Engine.

Unreal Engine надає можливість для інтеграції з зовнішніми пристроями, такими як VR-шоломи та керувальні панелі, що відкриває шлях для створення повністю занурюючих тренажерів. Ця сумісність забезпечує ще більш реалістичний досвід польоту, дозволяючи користувачам симулятора відчувати себе, ніби вони дійсно знаходяться за кермом FPV дрона.

1.4 Педагогічні аспекти навчання через симуляцію

Навчання через симуляцію вимагає спеціально розроблених методик та підходів, які сприяють засвоєнню необхідних навичок та знань. Важливо структурувати навчальний процес таким чином, щоб користувачі поступово просувалися від простих до більш складних завдань. Оцінка навчальних результатів може включати аналіз даних польоту, відстеження прогресу в навчанні та збір зворотного зв'язку для подальшого удосконалення симулятора [10, 11].

Ефективне навчання через симулятор залежить від інтеграції теоретичних знань і практичних навичок. Теоретичні модулі можуть охоплювати основи

аеродинаміки, принципи роботи дронів, навігаційні системи та правила безпеки польотів. Після засвоєння теоретичних засад, користувачі переходять до практичних вправ у симуляторі, де вони можуть застосувати отримані знання в контрольованих умовах.

Підхід, заснований на досягненні конкретних віх, дозволяє плавно переходити від простих завдань, таких як основи управління дроном, до більш складних місій, які вимагають рішення задач навігації, стратегічного планування та швидкої адаптації до змінних умов. Такий підхід сприяє побудові впевненості та компетентності користувачів.

Особливу увагу слід приділити індивідуальному підходу до навчання. Кожен користувач може мати різний рівень попереднього досвіду та здібностей. Симулятор повинен мати гнучкі налаштування, що дозволяють налаштовувати складність завдань та сценаріїв відповідно до індивідуальних потреб та прогресу користувача.

Функція зворотного зв'язку в симуляторі є ключовим елементом для ефективного навчання. Зворотний зв'язок може надаватися у вигляді візуальних підказок, аудіокоментарів або детального аналізу виконаних завдань. Це дозволяє користувачам швидко виявляти та виправляти помилки, сприяє кращому розумінню матеріалу та покращенню навичок управління.

Важливо також включати елементи ігровості та конкурентності в процес навчання через симулятор. Гейміфікація може збільшити мотивацію користувачів, роблячи навчальний процес більш захоплюючим і водночас ефективним. Завдання з елементами змагання або досягнення певних рівнів можуть допомогти утримати інтерес та стимулювати бажання вдосконалюватися.

Збір та аналіз даних про ефективність навчання є ще одним ключовим аспектом. Система симуляції може автоматично збирати дані про швидкість навчання, частоту помилок, стилі управління та інші ключові показники. Ця інформація може бути використана для адаптації та оптимізації навчального процесу, а також для персоналізації навчальних планів для кожного користувача [12, 13].

Врахування педагогічних аспектів у розробці та використанні віртуальних симуляторів є критично важливим для забезпечення високоякісного та ефективного навчання. Інтеграція теоретичних знань, практичних навичок, індивідуального підходу та аналітичних інструментів дозволяє створити комплексний та динамічний досвід навчання, який відповідає потребам сучасного ринку та вимогам користувачів.

FPV дрони істотно розвиваються як у військових, так і в цивільних сферах. У військовому контексті, дрони використовуються для розвідки, спостереження та навіть ударних місій. Однак, навички, набуті військовими пілотами під час навчання та керування дронами, можуть бути використані в цивільному житті. Це включає такі області, як аерофотозйомка, моніторинг довкілля, рятувальні операції та сільськогосподарські дослідження.

Тема переробка симуляторів під цивільні цілі та працевлаштування військових пілотів котрі закінчили службу також є актуальною. Симулятори, спочатку розроблені для військових цілей, можуть бути адаптовані для цивільних застосувань. Це дає можливість військовим пілотам, а також цивільним користувачам, використовувати ці важливі інструменти для підготовки та розвитку навичок в безпечному та контрольованому середовищі, а для військових – мати роботи у цивільному житті де знадобляться їх навички. Адаптація симуляторів може включати модифікацію сценаріїв, завдань та інтерфейсу для відповідності специфічним цивільним потребам.

Майбутнє FPV Дронів у Цивільних Індустріях: FPV дрони продовжують знаходити нові застосування в цивільних індустріях. Наприклад, вони можуть бути використані для збору даних про стан інфраструктури, моніторингу природних катастроф або навіть у розважальній індустрії для зйомки з повітря (рисунок 1.8). Розвиток технологій FPV і штучного інтелекту може сприяти створенню більш автономних, ефективних та безпечних систем керування дронами.



Рисунок 1.8 – FPV дрон гасить пожежу в хмарочосі.

Глобальні Тенденції та Інновації: Ринок FPV дронів продовжує рости, залучаючи інвестиції та інновації. Очікується, що нові технологічні розробки, такі як покращення дальності польоту, точності навігації та інтеграції з іншими технологічними системами, забезпечать ширший спектр можливостей для використання FPV дронів.

1.5 Тестування та оптимізація симулятора

Тестування симулятора є ключовим етапом у розробці, що гарантує його надійність та ефективність. Включає в себе ряд тестів, спрямованих на перевірку функціональності, продуктивності та стабільності програмного забезпечення. Збір та аналіз зворотного зв'язку від користувачів допомагає виявити слабкі місця та аспекти, які потребують оптимізації, з метою поліпшення загального користувацького досвіду.

1.6 Постановка задачі дослідження

Таким чином, тема "Дослідження і розробка віртуального симулятора для навчання управління FPV дроном" є надзвичайно актуальною у сучасному контексті зростаючого використання безпілотних літальних апаратів у різноманітних галузях – від розваг і спорту до комерційних та навіть військових застосувань. Розвиток та впровадження віртуальних симуляторів для навчання дозволить знизити поріг входу для нових користувачів, зменшити ризики та витрати, пов'язані з реальним пілотуванням дронів, а також підвищити якість та ефективність навчального процесу. Використання інноваційних технологій, таких як віртуальна реальність, відкриває нові можливості для підготовки висококваліфікованих спеціалістів у цій швидкозростаючій області.

Об'єктом дослідження є процес створення та використання віртуального симулятора для навчання управління FPV дронами. Це включає розробку програмного забезпечення симулятора, впровадження фізичних моделей польоту дронів, а також методи та техніки навчання, які застосовуються у віртуальному середовищі для підготовки пілотів дронів.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є дослідження і розробка віртуального симулятора для навчання управління FPV дроном. Дослідження спрямоване на створення інтерактивного, реалістичного та педагогічно ефективного тренажеру, який би дозволив користувачам безпечно та ефективно освоювати навички пілотування FPV дронів. Особлива увага приділяється інтеграції сучасних технологій віртуальної реальності для підвищення іммерсивності навчального процесу.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- аналіз існуючих рішень у сфері FPV дронів та віртуальних симуляторів;
- розробка концепції віртуального симулятора;
- інтеграція симулятора з технологіями VR/AR;
- тестування та оцінка ефективності симулятора;
- оптимізація та доопрацювання симулятора.

2 РОЗШИРЕНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВІРТУАЛЬНОГО СИМУЛЯТОРА FPV ДРОНІВ

В рамках цього дослідження було вирішено розробити повноцінний віртуальний симулятор для навчання управлінням FPV дроном. Проект реалізовується на базі потужного ігрового движка Unreal Engine, який надає необхідні інструменти для створення високодеталізованих та реалістичних віртуальних середовищ.

2.1 Детальне математичне моделювання динаміки польоту дронів

Моделювання динаміки польоту дронів вимагає глибокого розуміння фізичних законів та здатності точно їх відтворити в рамках програмної моделі. Розробка цієї моделі включає кілька ключових етапів:

Аналіз сил, що діють на дрон. Основою для розрахунків є вивчення сил, які впливають на дрон під час польоту. Це включає не тільки гравітаційну силу та силу тяги, але й аеродинамічний опір, бічні сили, що виникають при маневруванні, та інші фактори, які можуть впливати на поведінку дрона в повітрі.

Моделювання керування дроном. Ключовим аспектом є здатність дрона реагувати на команди пілота. Система управління дроном має враховувати зміну швидкостей обертання пропелерів для зміни напрямку руху, висоти, а також орієнтації в просторі. Математичні моделі, які описують ці процеси, включають в себе алгоритми PID-регулювання, що забезпечують стабільність та точність виконання польотних маневрів.

Для реалістичної симуляції польоту важливо враховувати різні зовнішні фактори, такі як вітрові умови, зміни температури, які можуть впливати на аеродинамічні характеристики та поведінку дрона. Моделювання цих умов залежить від здатності точно імітувати такі фізичні явища як турбулентність, зміну атмосферного тиску та інші.

Рівняння стану для моделювання динаміки. Основою математичної моделі є система рівнянь стану, що відображають динаміку руху дрона.

Використання числових методів для розв'язання рівнянь. Для імплементації цих моделей у програмному забезпеченні використовуються числові методи розв'язання диференціальних рівнянь, такі як метод Рунге-Кутти, що дозволяє точно відтворити поведінку дрона в часі.

Спостереження за польотом дронів часто порушує питання про механізми їх стабільності в повітрі. Мультикоптери, завдяки своїм широким можливостям застосування, стали одним з найінноваційніших засобів польоту та транспортування. Проте за кулісами відбуваються складні математичні обчислення, щоб точно відповідати на команди управління, враховуючи зовнішні впливи.

Маневрування дроном у тривимірному просторі здійснюється шляхом контролю частот обертання кожного окремого ротора, що дозволяє системі виконувати бажаний рух. В цьому процесі деякі ротори прискорюються для зміни орієнтації мультироторної системи відповідно до команд пілота. В основі керуючого контролера (комп'ютера кожного дрона) знаходиться програма розподілу управління. Вона використовує команди пілота для створення різноманітних вхідних даних у вигляді матриць, здійснює ряд перетворень та обчислень лінійної алгебри для розрахунку вихідних значень. Особливо цікавим на математичному рівні є той факт, що зі збільшенням кількості роторів зростає кількість способів розподілу швидкостей обертання роторів.

Настройка та розміщення окремих моторів є найважливішою інформацією для математичних обчислень. Це також включає вагу та розташування центру мас. Це пояснює, чому дрон падає або втрачає стабільність під час несподіваного додавання вантажу. Існує багато різних конфігурацій або схем розміщення мультироторних систем, від найпоширеніших Quad-, Hexa- та Octocopters до менш звичайних розташувань, як-от Coaxial-, Bi-, Tri-, Penta- або Heptacopters. У переважній більшості у військових цілях використовують найпоширеніший тип FPV дронів – Quad. На рисунку 2.1 зображено основні типи дронів.

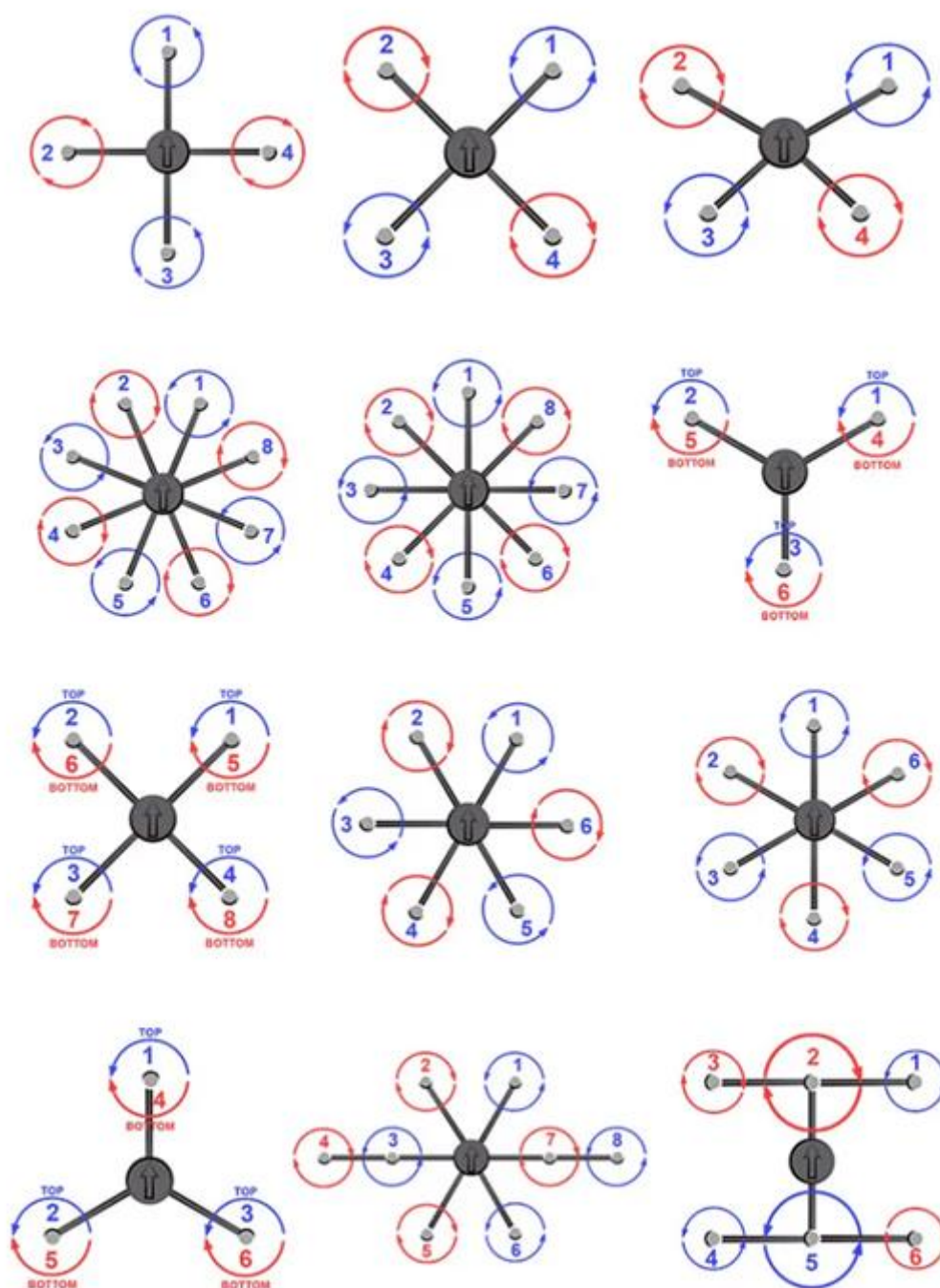


Рисунок 2.1 – Основні існуючі типи дронів.

Для керування дронами деякі ротори прискорюються або уповільнюються для зміни орієнтації мультиротора відповідно до вхідних даних пілота. Зазвичай мультикоптери працюють на роторах з фіксованим кутом нахилу лопатей, що означає, що окремі лопаті не можуть регулюватися за кутом нахилу. Під час обертання вони створюють не тільки тягу, але й момент обертання навколо власної осі, що могло б змусити дрон обертатися. Щоб усунути це, половина роторів обертається за годинниковою стрілкою, а інша половина - проти. Крутний

момент роторів компенсується, коли вони працюють з однаковими швидкостями, і літальний апарат може зависати у стабільному положенні. Якщо літальному апарату потрібно котитися, швидкість гвинта повинна бути прискорена з одного боку осі крену та сповільнена з іншого боку. Це призводить до бічного руху (тангажу) через зміну орієнтації вектора тяги. Приклад наведено на рисунках 2.2 та 2.3.

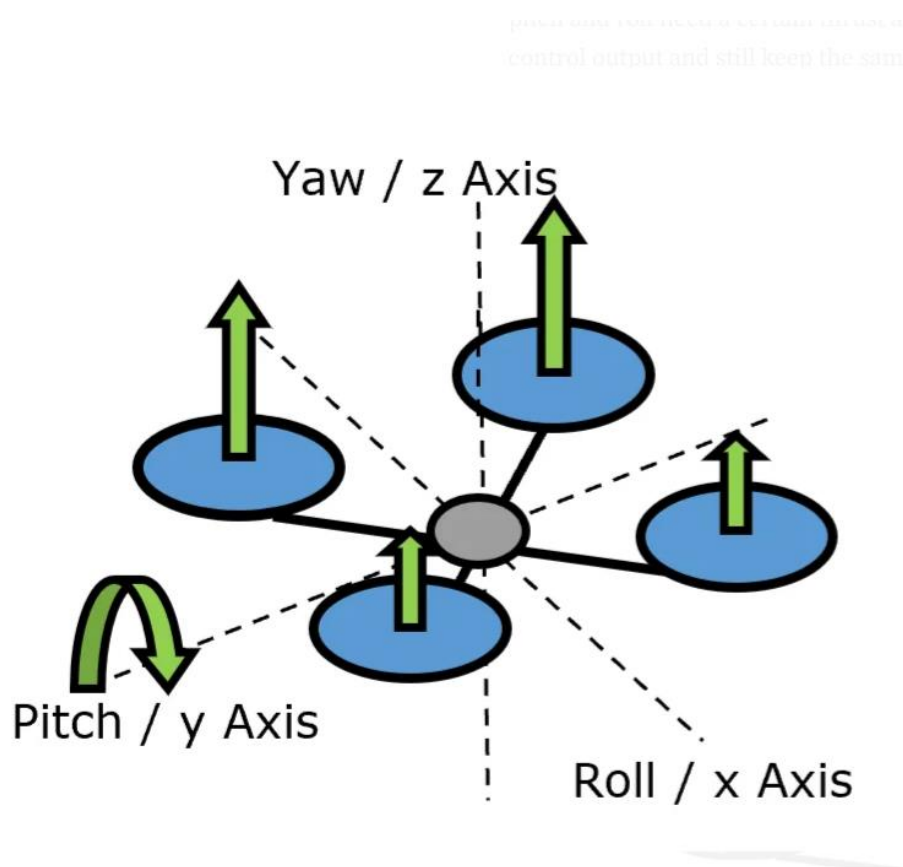


Рисунок 2.2 – Перший приклад бічного руху дрону

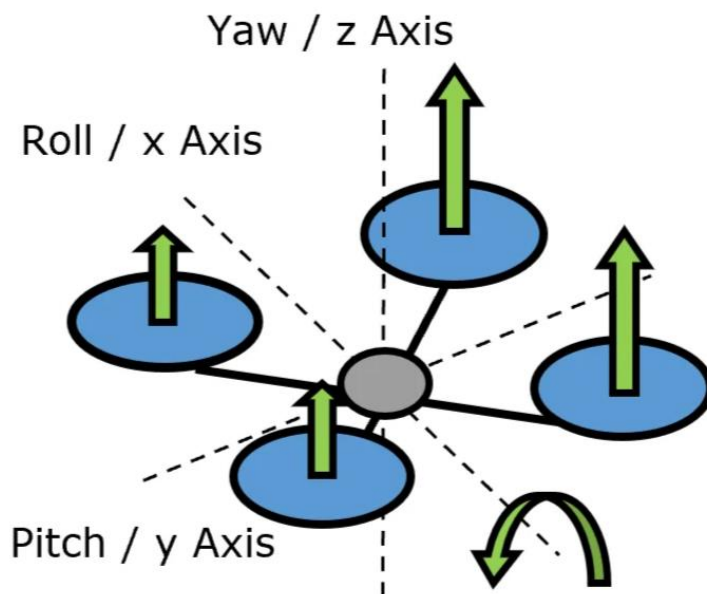
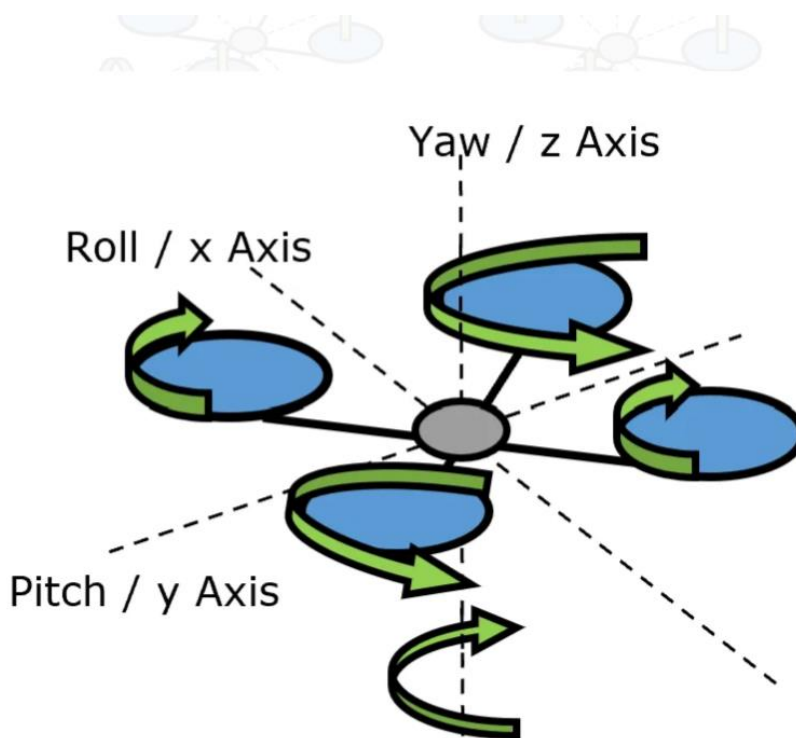


Рисунок 2.3 – Другий приклад бічного руху дрону.

Те саме стосується керування навколо осі кроку. Приклад зображено на рисунку 2.4.



Because k is a constant thrust coefficient which is only dependent on the

Рисунок 2.4 – Приклад обертв дрону.

Для підйому та спуску швидкості роторів збільшуються або зменшуються однаково [14, 15].

Також дрони можуть коригувати своє становище у просторі. Для цього перед початком польоту проводиться калібрування (тримірування) за допомогою датчика положення у просторі. Таким функціоналом мають практично всі дрони, включаючи бюджетні моделі. Коли дрон оснащують боєприпасами стає необхідним проводити калібрування заново так як змінюється його маса. До того ж, боєприпас не може бути закріплений точно по центру, тому дана процедура (тримірування) є необхідною. Приклад того, як виглядає процес калібрування, зображений на рисунку 2.5.

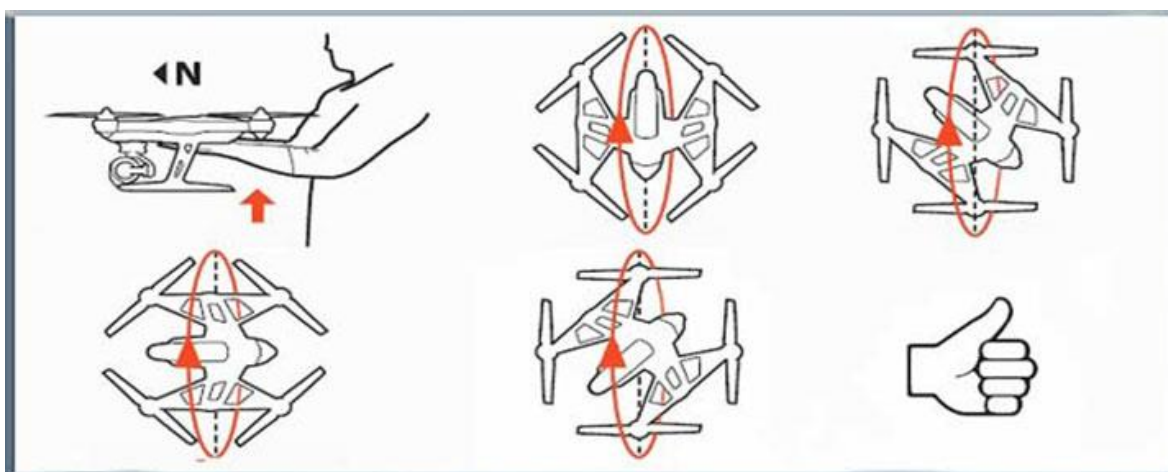


Рисунок 2.5 – Процес тримірування дрону.

Дивлячись на джойстик - пристрій для керування дроном, то навколо керувальної панелі монжо побачити кнопки тонкої настройки. Вони дозволяють коригувати рухи. Наприклад, щоб перемістити дрон вправо, потрібно натиснути кнопку тонкої настройки праворуч. Щоб спостерігати за рівнем або прогресом настройки, можна звернутися до екрану на контролері.

Правий джойстик відповідає за керування креном та тангажем. Він переміщує ваш дрон вліво/вправо та вперед/назад. Лівий джойстик регулює висоту польоту (газ) та обертає ваш дрон за годинниковою та проти годинникової стрілки (курсовий угол).

Майже всі дрони мають чотири кнопки тонкої настройки: праворуч, ліворуч, вперед та назад. Настройки вперед та назад називають тангажем дрона або тангажними настройками. Комбінуючи тангаж із креном, дрон зможе виконувати повороти з накреном, змінюючи напрямки плавно та швидко. Контролер тангажної настройки – це маленький перемикач на пульті дистанційного керування ліворуч від правого джойстика [16, 17].

Кнопки ліворуч та праворуч називають креном або настройками крену. Це маленький перемикач під правим джойстиком. Також є перемикач курсового углу, який знаходиться під лівим джойстиком. Він забезпечує баланс обертання дрона вправо та вліво. На рисунку 2.6 зображено приклад контролеру.



Рисунок 2.6 – Контролер для керування дроном.

2.2 Програмна реалізація симулятора у Unreal Engine

Програмна частина проекту зосереджена на створенні віртуального середовища, що відповідає реальним умовам польоту FPV дронів.

Інтеграція математичної моделі в Unreal Engine: Після розробки математичної моделі її інтеграція у движок Unreal Engine вимагає створення специфічних скриптів та функцій. Використовуючи C++ або Blueprints, реалізуються алгоритми, що відповідають за розрахунок положення та орієнтації дрона, обробку сигналів управління та інші важливі аспекти симуляції польоту. Наприклад, у Blueprint було створено логіку, яка обробляє вхідні сигнали від джойстика, конвертує їх у значення throttle, yaw, pitch, roll та інші параметри управління дроном. Ці значення потім передаються до моделі дрона в ігровому середовищі, де вони впливають на його рух та орієнтацію відповідно до введених команд (приклад керування дроном наведено на рисунку 2.7).

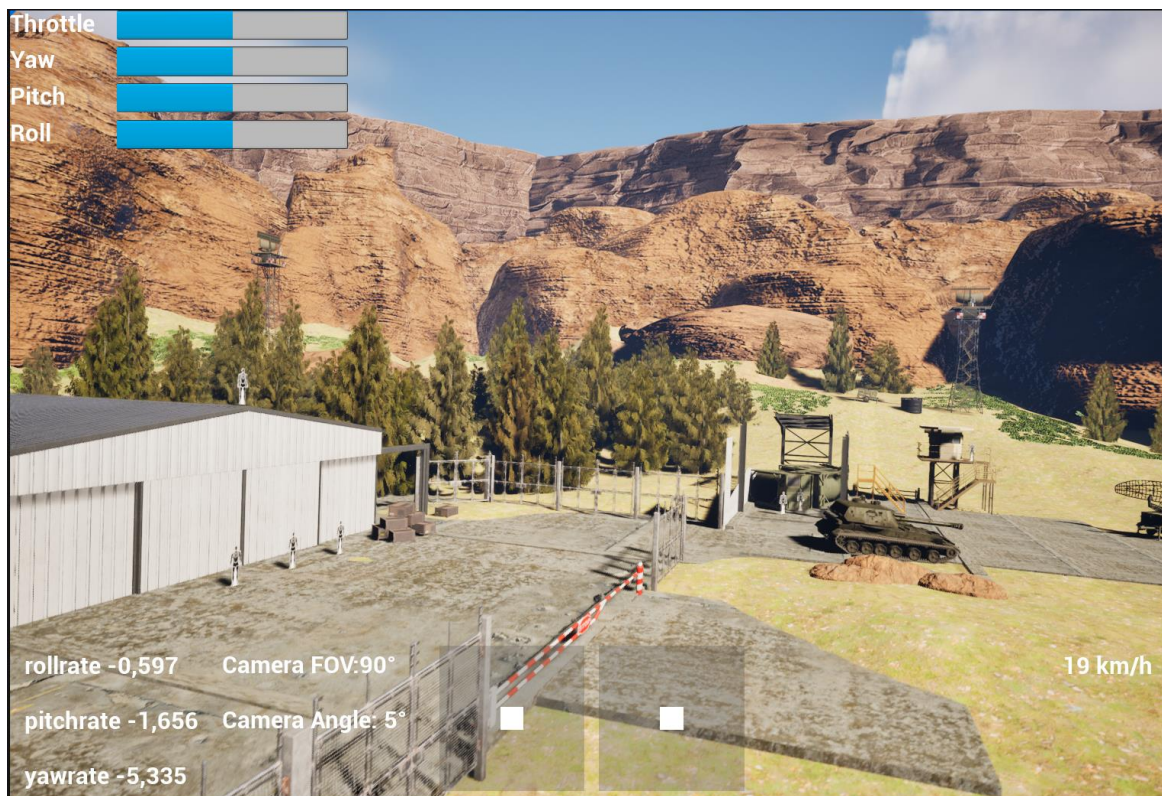


Рисунок 2.7 – Приклад керування дроном.

Розробка інтерактивного інтерфейсу користувача є критично важливим для забезпечення інтуїтивного та ефективного досвіду пілотування. Він включає в себе візуалізацію таких показників, як швидкість, висота польоту, стан батареї, а також систему управління, що імітує реальні пульти управління FPV дронами.

Створення реалістичного віртуального середовища є однією з переваг Unreal Engine так як в ньому є можливість створення високодеталізованих та реалістичних віртуальних середовищ (приклад наведено на рисунках 2.8 та 2.9). Це означає моделювання різних погодних умов, ландшафтів та інших сценаріїв, які дрон може зустріти в реальному житті.



Рисунок 2.8 – Віртуальне середовище.



Рисунок 2.9 – Віртуальне середовище.

Програмування фізики польоту стає можливим завдяки використанню вбудованих можливостей Unreal Engine для симуляції фізичних властивостей, таких як гравітація та колізії, а також кастомізація цих налаштувань для відповідності специфіці динаміки польоту FPV дронів. Реалізація механіки управління дроном включає обчислення, що базуються на введенні користувача, та їх перетворення в керуючі команди для симульованого дрона.

Створення різних тренувальних модулів, що включають відтворення реальних ситуацій та завдань, які можуть виникнути під час польоту дронів є дуже важливим моментом. Це можуть бути прості завдань, такі як польоти на визначену висоту або дистанцію, або більш складні сценарії, які включають навігацію через перешкоди або виконання конкретних місій.

Інтеграція VR/AR технологій потрібна для забезпечення глибокої іммерсивності та реалістичного досвіду, симулятор інтегрується з VR або AR технологіями. Це дозволяє користувачам зануритися у віртуальний світ, що імітує реальне пілотування дрона, забезпечуючи більш ефективно та захоплююче навчання.

Тестування та налагодження симулятора протягом усього процесу розробки забезпечує, що симулятор працює бездоганно та точно відтворює реальні умови польоту. Включає в себе як автоматичне тестування окремих компонентів та модулів, так і юзабіліті-тестування з реальними користувачами для оцінки загальної якості взаємодії та досвіду користування. Приклад тестування зображено на рисунку 2.10.

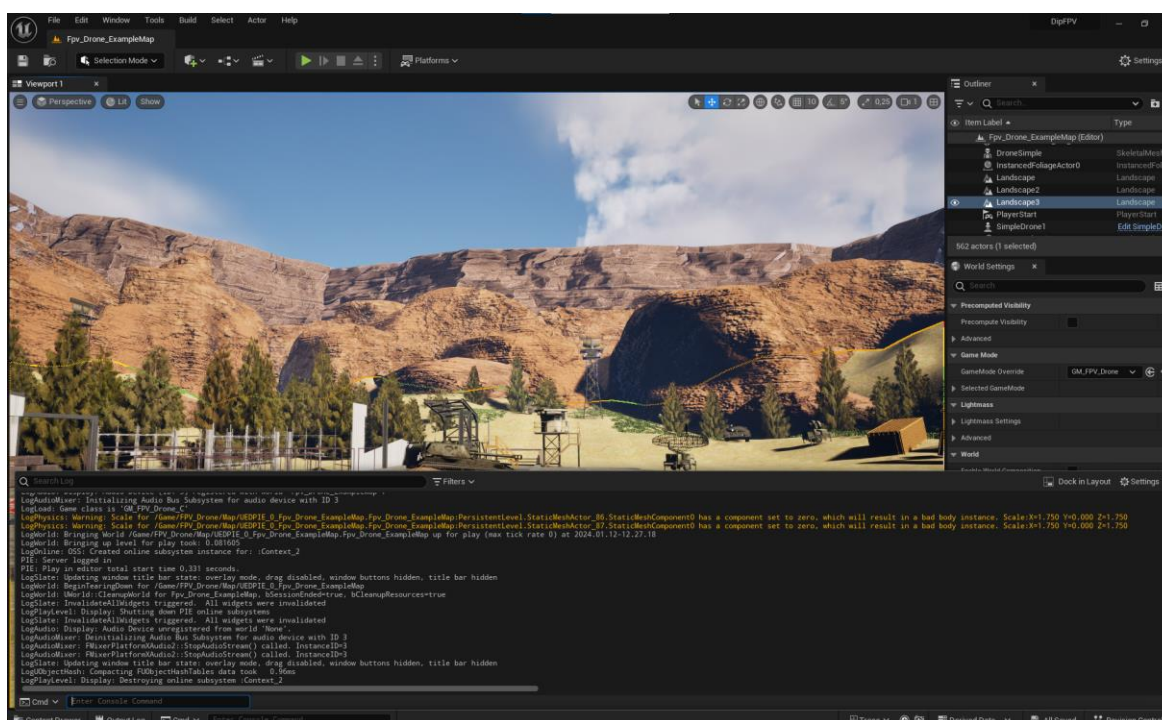


Рисунок 2.10 – Приклад тестування.

2.3 Аналіз даних та оптимізація симулятора

Наприкінці процесу розробки проводиться аналіз зібраних даних для оцінки ефективності симулятора. Це включає в себе оцінку точності математичних моделей, адекватності реакції симулятора на команди користувача, та загального рівня задоволеності користувачів. На основі цього аналізу вносяться необхідні корективи та оптимізації, що включають:

Оптимізація математичних моделей. На основі зворотного зв'язку та результатів тестувань можуть бути внесені зміни в математичні моделі для забезпечення більшої точності та реалістичності.

Покращення інтерфейсу користувача та управління є ще одним напрямком розвитку. Ітеративне вдосконалення інтерфейсу та систем управління може бути зроблено з метою забезпечення зручності та інтуїтивності для кінцевих користувачів. Покращення інтеграції з VR/AR технологіями для забезпечення більш занурювального та вражаючого досвіду.

Аналіз реалістичності сценаріїв та місій вкрай необхідний. Важливо забезпечити, що кожна тренувальна місія або сценарій не тільки навчає користувачів основам пілотування, але й відтворює реальні умови та ситуації, які можуть виникати під час польоту. Аналізуються відгуки користувачів та результати тестувань для підвищення рівня реалізму та ефективності навчальних модулів.

Оптимізація продуктивності та стабільності є показником гарного додатку. Забезпечення високої продуктивності та стабільності симулятора є ключовим для надання користувачам безперебійного та якісного досвіду. Аналіз продуктивності включає оцінку швидкості обробки даних, графічного рендерингу та відгуку на команди користувача. На основі цього аналізу вносяться вдосконалення, що можуть включати оптимізацію коду, поліпшення алгоритмів обробки даних, а також усунення будь-яких виявлених помилок або збоїв.

У міру розвитку проекту, симулятор може бути доповнений новими функціями або можливостями, які зроблять його більш вдосконалим та привабливим для користувачів. Це може включати розробку додаткових тренувальних місій, інтеграцію більш складних моделей погоди та середовища, а також впровадження нових інтерактивних елементів для підвищення рівня залученості та навчальної ефективності.

Завершуючи цей розділ, важливо підкреслити, що успіх розробки симулятора залежить не тільки від технічної точності та продуктивності, а й від здатності створити інтерактивний та занурювальний досвід, який забезпечить користувачам ефективне навчання та високий рівень задоволення від процесу.

За допомогою сучасних технологій, інноваційного підходу до дизайну та постійного вдосконалення, цей проект ставить собі за мету стати важливим

інструментом у навчанні пілотів FPV дронів, відкриваючи нові можливості для військових.

3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА РАЗРОБКА ІНТЕРФЕЙСУ

3.1 Обґрунтування вибору середовища програмної реалізації

У рамках кваліфікаційної роботи була розроблена програмна частина віртуального симулятора для навчання управлінням FPV дроном. Робота включала детальне дослідження різних технологічних платформ та обґрунтування вибору найбільш підходящого середовища для реалізації проекту.

Важливим етапом проекту було визначення оптимальної платформи для реалізації віртуального симулятора. Вибір платформи здійснювався на основі кількох ключових критеріїв, що включають гнучкість, масштабованість, доступність ресурсів для розробки, технічні можливості та підтримка спільноти.

Було обрано середовище Unreal Engine від компанії Epic Games, яке є одним з найпопулярніших та найпотужніших ігрових движків на сучасному ринку. Основні переваги Unreal Engine для цього проекту включають:

Високоякісна графіка та візуалізація є перевагою даного середовища розробки. Unreal Engine відомий своїми передовими можливостями в області візуалізації, що дозволяє створювати реалістичні та деталізовані віртуальні середовища. На рисунку 3.1 зображен процес створення середовища симулятора. Якість візуалізації критично важлива так як вона безпосередньо впливає на іммерсивність та реалістичність досвіду користувача.

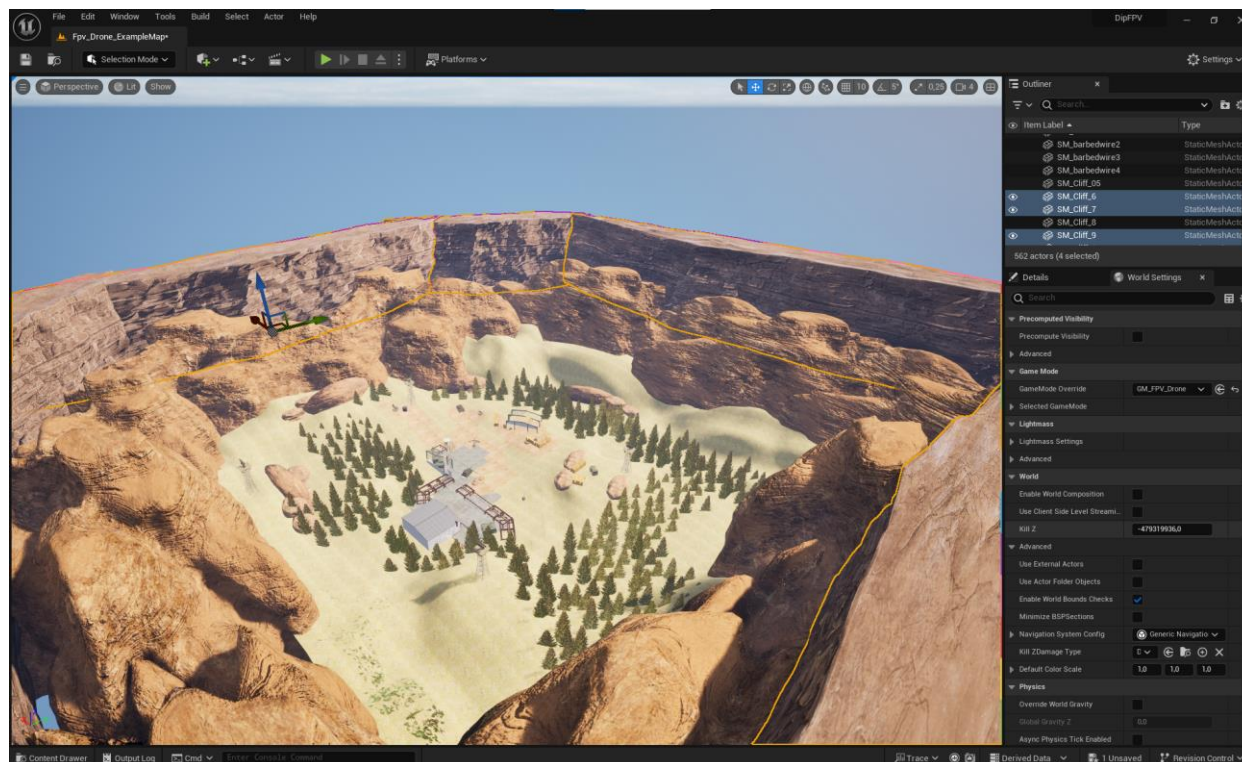


Рисунок 3.1 – Процес створення середовища симулятора.

Потужні інструменти моделювання та анімації також присутні. Unreal Engine пропонує широкий спектр інструментів для моделювання, анімації, та створення складних інтерактивних сценаріїв. Це дозволяє точно відтворити різноманітні сценарії польотів дронів та надає розробникам гнучкість у створенні навчальних модулів. Для цього було додано кілька варіантів противників (цілей) – танк, сау, РЛС та мішені у вигляді солдатів. Приклад зображено на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Варіанти цілей у симуляторі.

Багатий набір розробницьких інструментів: Unreal Engine містить багатий набір інструментів для розробки, включаючи візуальну систему скриптів Blueprints (приклад якої наведено на рисунку 3.2), що дозволяє розробникам швидко прототипувати та реалізовувати складні функціональні можливості. На рисунку 3.3 зображено схему роботи контролера за допомогою Blueprints. На рисунках 3.4 – 3.21 – схема роботи компонентів Blueprint класу дрона. Blueprints в Unreal Engine відрізняється гнучкістю та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом, що робить її ідеальним вибором для розробників ігор та інтерактивних додатків. Основні переваги включають:

Blueprints дозволяє розробникам створювати складні логічні структури без потреби у глибоких знаннях текстового програмування. Це робить розробку доступною навіть для тих, хто має обмежений досвід у кодуванні.

Швидкість, з якою можна реалізувати ідеї у Blueprints, значно скорочує час розробки. Розробники можуть швидко створювати та тестувати функціонал, що особливо важливо в динамічних проектах, таких як симулятори. Blueprints підтримує створення високоінтерактивних та реактивних елементів, що є

ключовим для симуляторів, де важливо імітувати реалістичні реакції на дії користувача.

Blueprints пропонує ряд потужних інструментів та функцій, які можуть бути використані для розробки симуляторів:

Логіка Геймплея. Система дозволяє розробникам легко імплементувати складну логіку геймплею, від простих дій до складних алгоритмічних процесів.

Інтеграція з Активами. Blueprints спрощує інтеграцію з графічними та аудіо активами, що дозволяє створити багатий і занурюючий візуальний досвід.

Кастомізація Інтерфейсу Користувача. Розробники можуть використовувати Blueprints для створення кастомізованих інтерфейсів користувача, забезпечуючи інтуїтивно зрозуміле керування та навігацію.

Симуляція Фізики та Оточення: Blueprints ефективно використовує фізичний движок Unreal Engine для імітації реалістичних рухів та взаємодій у віртуальному світі.

Важливою особливістю Blueprints є її здатність інтегруватися з іншими системами Unreal Engine та зовнішніми інструментами. Наприклад, можна використовувати API для збору даних з симулятора або інтегрувати Blueprints з системами штучного інтелекту для створення більш складних сценаріїв. Blueprints продовжує еволюціонувати, пропонуючи все більше можливостей для розробки. Його роль у створенні освітніх та тренувальних симуляторів, особливо у сфері FPV дронів, є ключовою. Із зростанням потреби в реалістичних та інтерактивних симуляціях, Blueprints буде продовжувати відігравати значну роль у цій галузі.

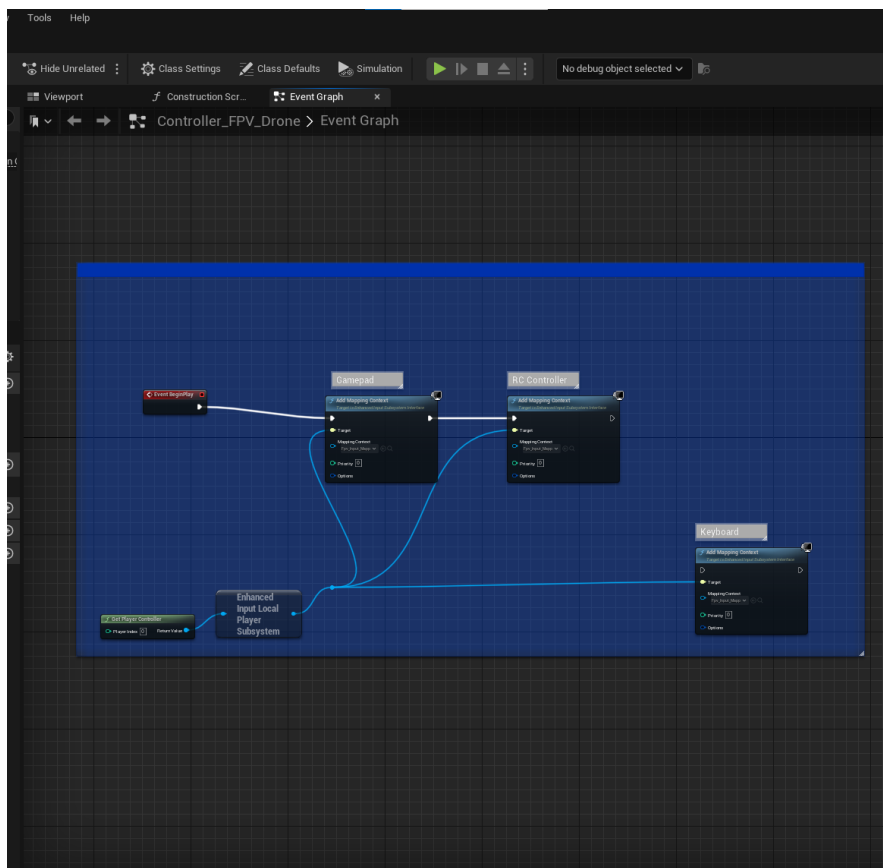


Рисунок 3.3 – Схема роботи контролеру у Blueprints.

Даний клас був розроблений для того, щоб додати різні методи управління дроном до проекту. Таким чином, симулятор можуть використовувати люди, у яких немає контролера, або, наприклад, є тільки геймад. Однак не менш важливим є той факт, що дроном у симуляторі можна керувати і за допомогою спеціального контролера (RC).

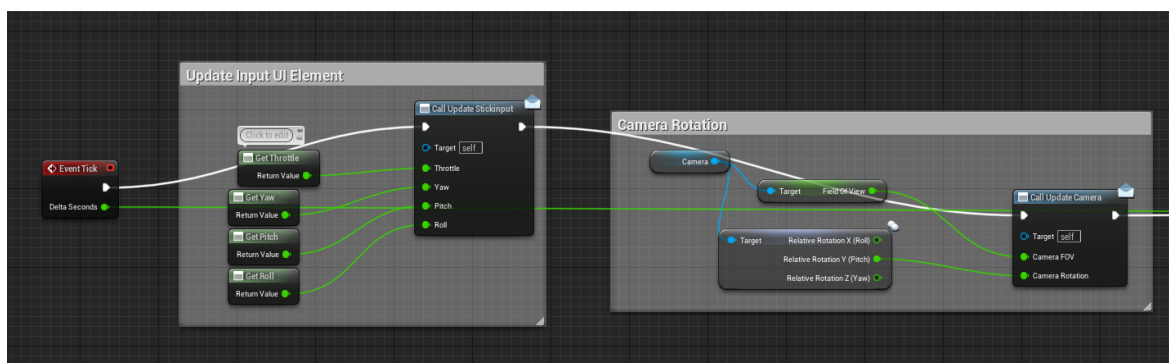


Рисунок 3.4 – Схема Update Input Element та Camera Rotation Blueprints.

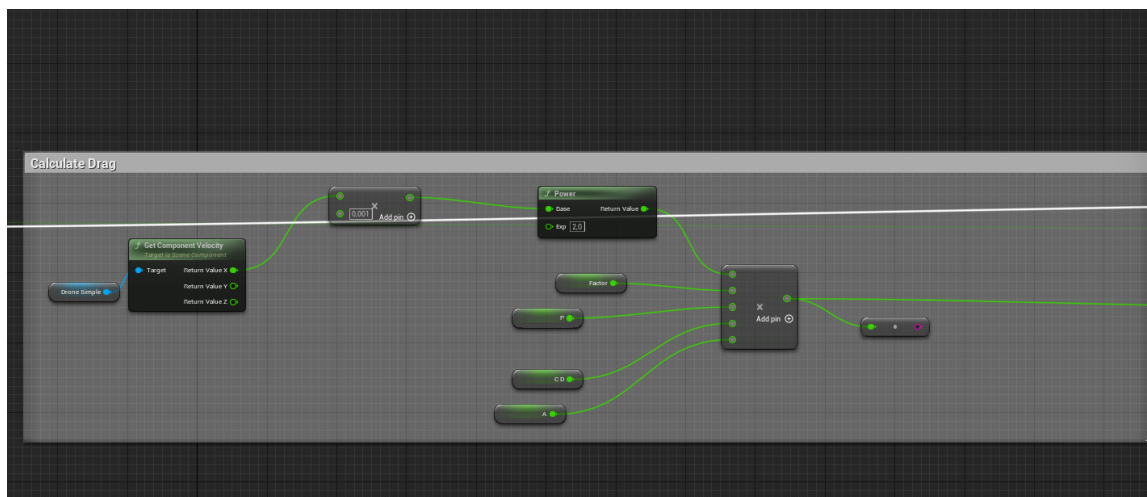


Рисунок 3.5 – Схема роботи Blueprints компоненту Calculate Drag.

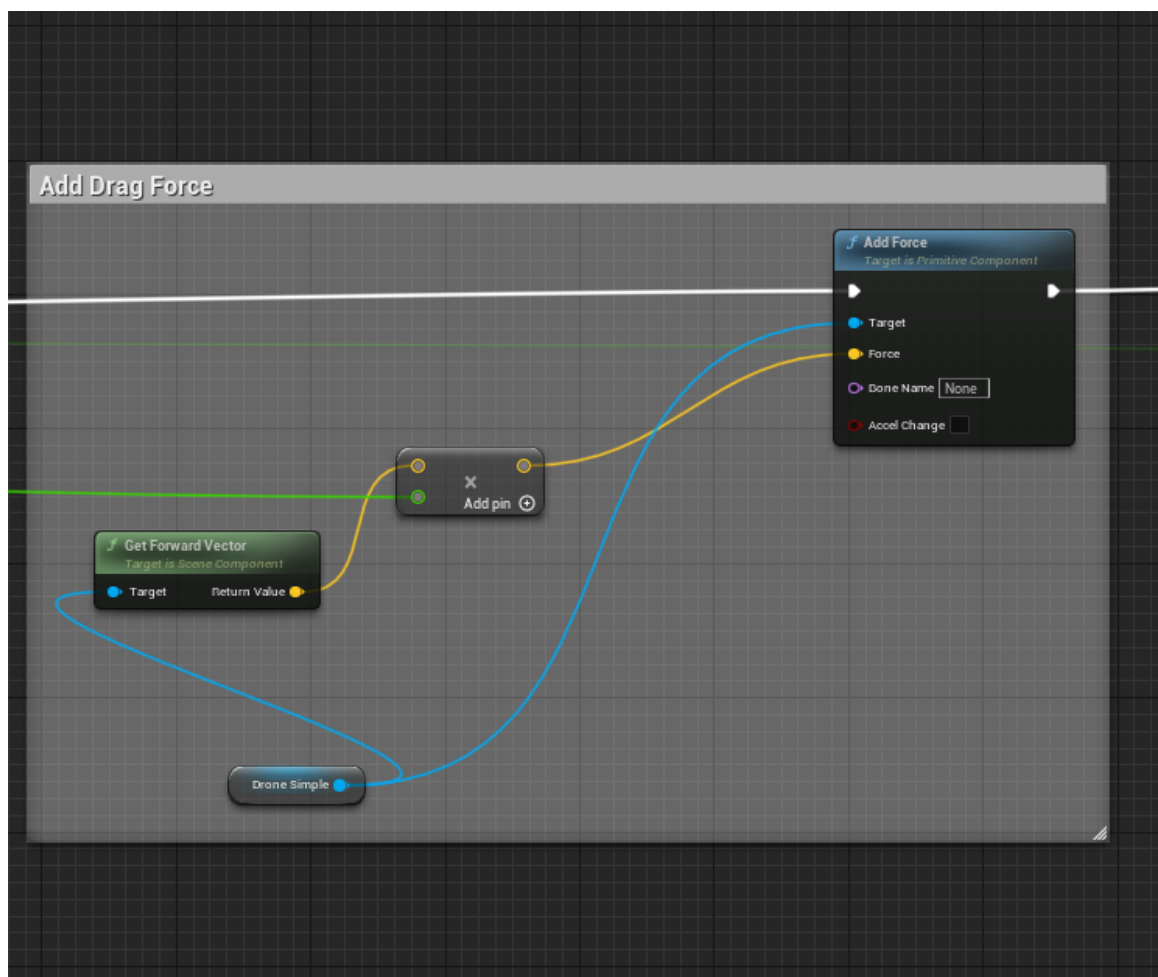


Рисунок 3.6 – Схема роботи Blueprints компоненту Calculate Drag.

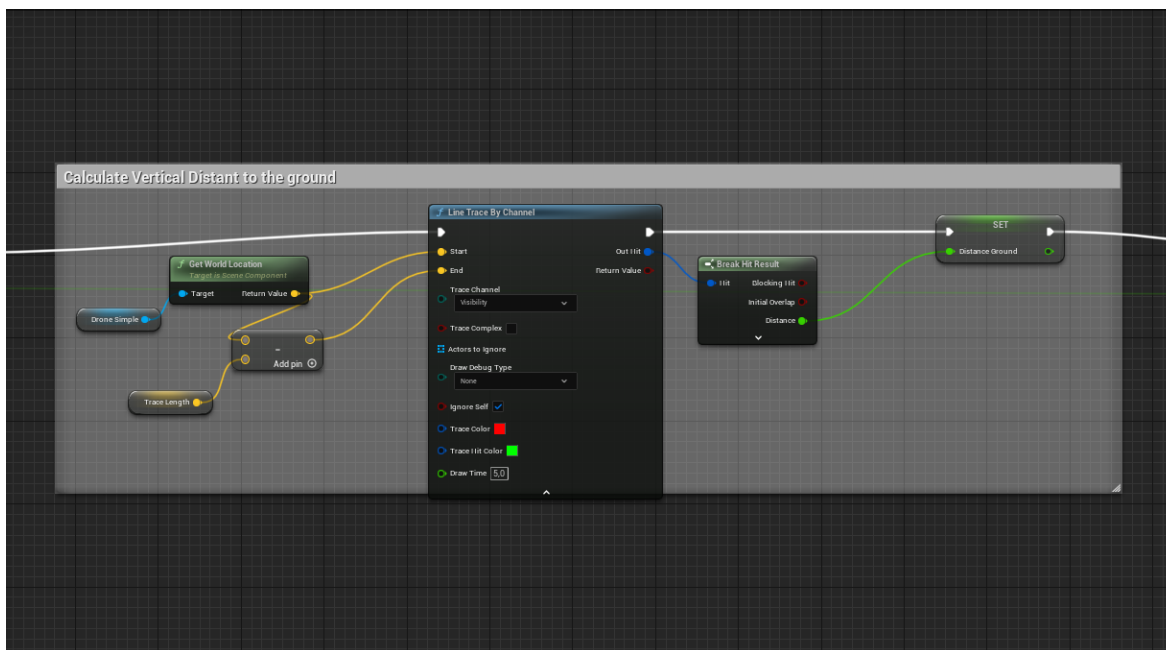


Рисунок 3.7 – Схема роботи Blueprints компоненту Calculate Vertical Distant to the ground.

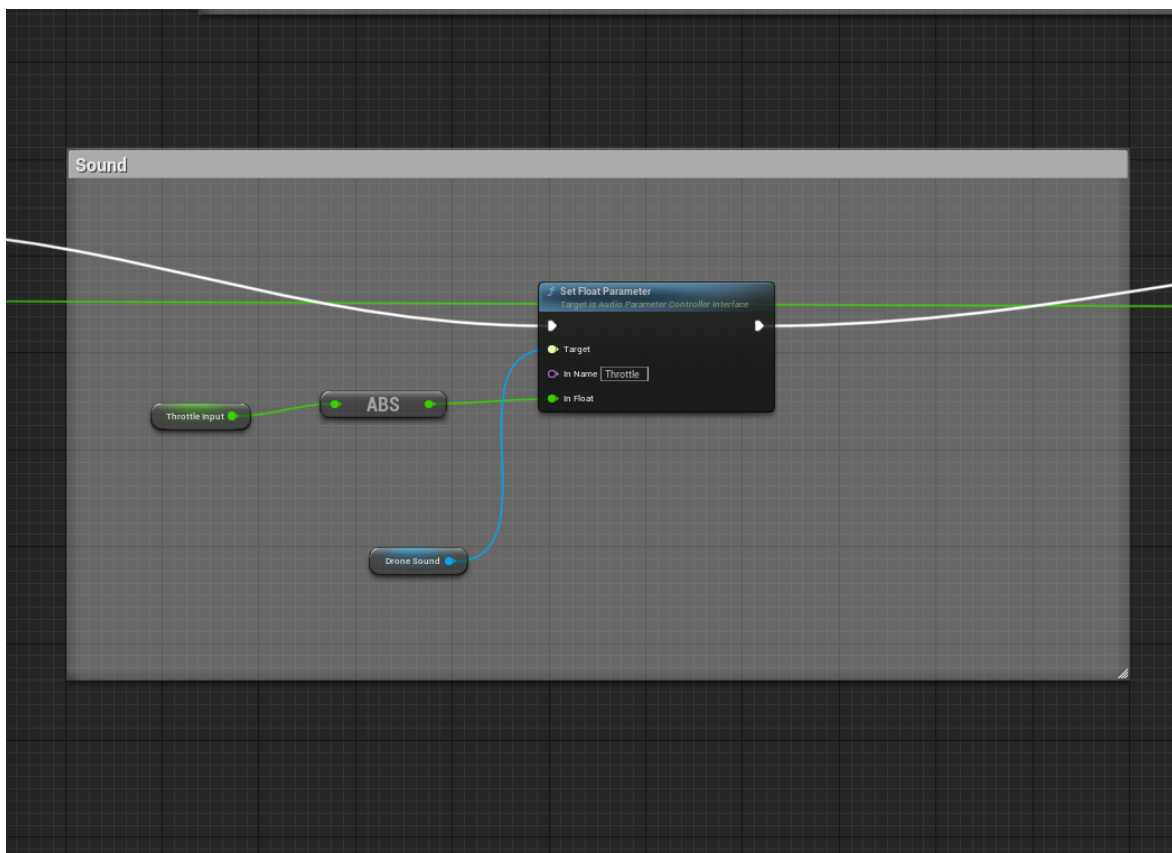


Рисунок 3.8 – Схема роботи Blueprints компоненту Sound.

Ця функція дає можливість чути звуки польоту дрону. Динамічна зміна звуку дає можливість почути шум, що наростає, при затиснутому аксілераторі, коли ротор починає працювати швидше.

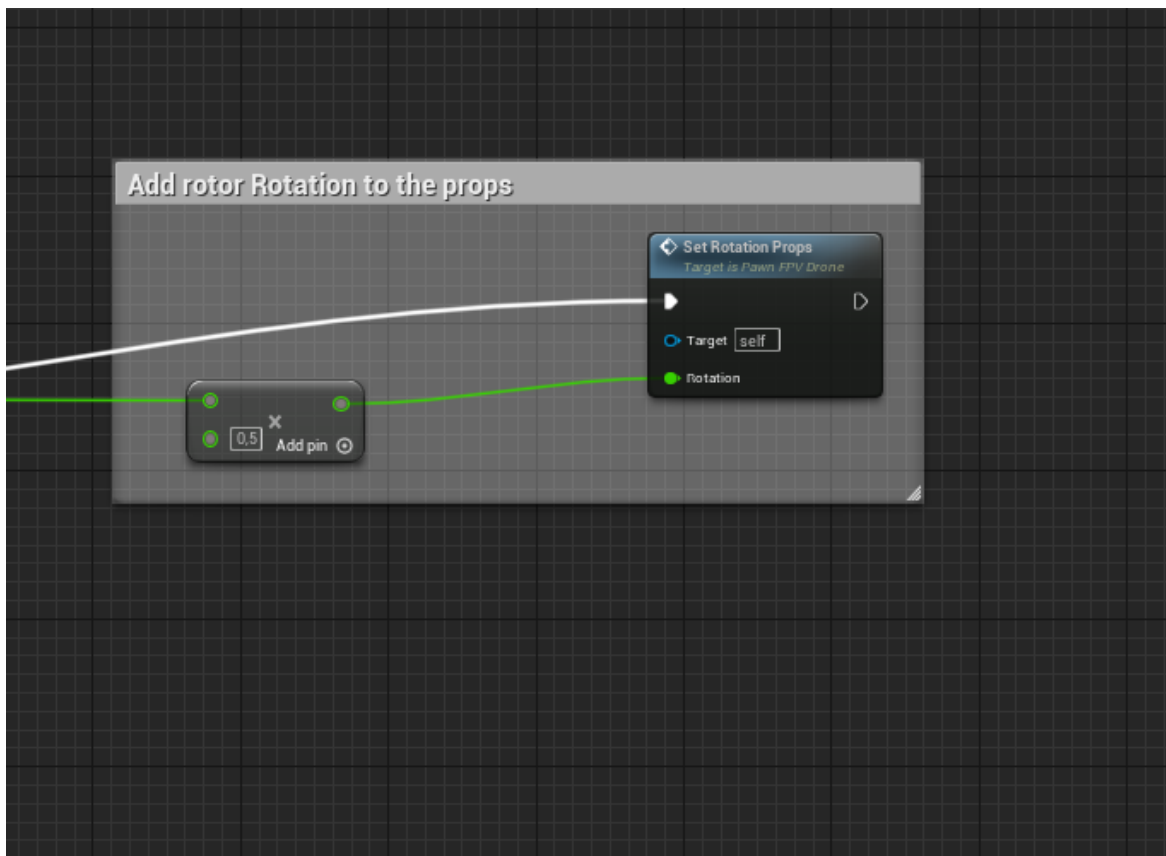


Рисунок 3.9 – Схема роботи Blueprints компоненту Add rotor Rotation to the props.

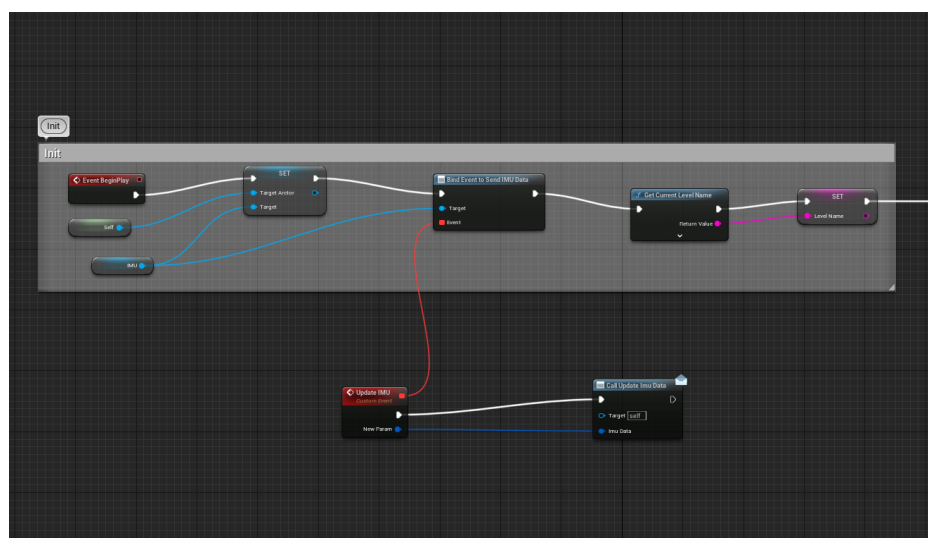


Рисунок 3.10 – Схема роботи Blueprints компоненту Init

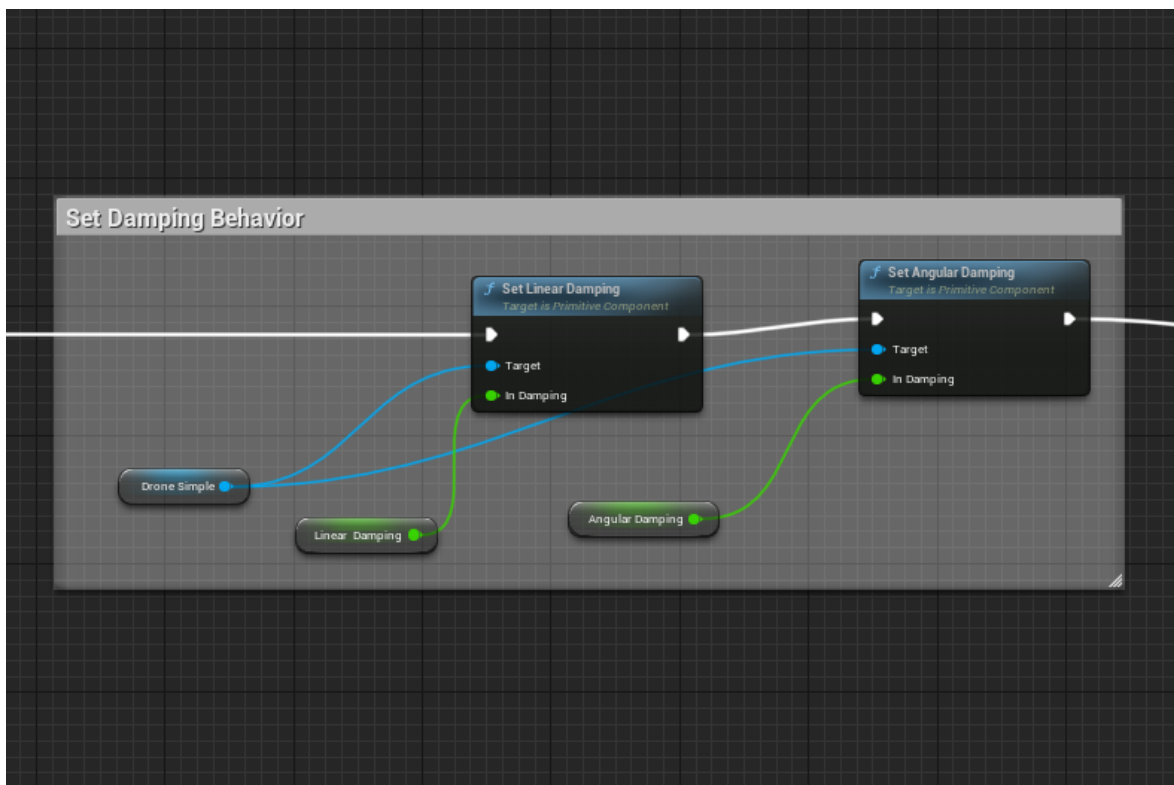


Рисунок 3.11 – Схема роботи Blueprints компоненту Set Damping Behavior.

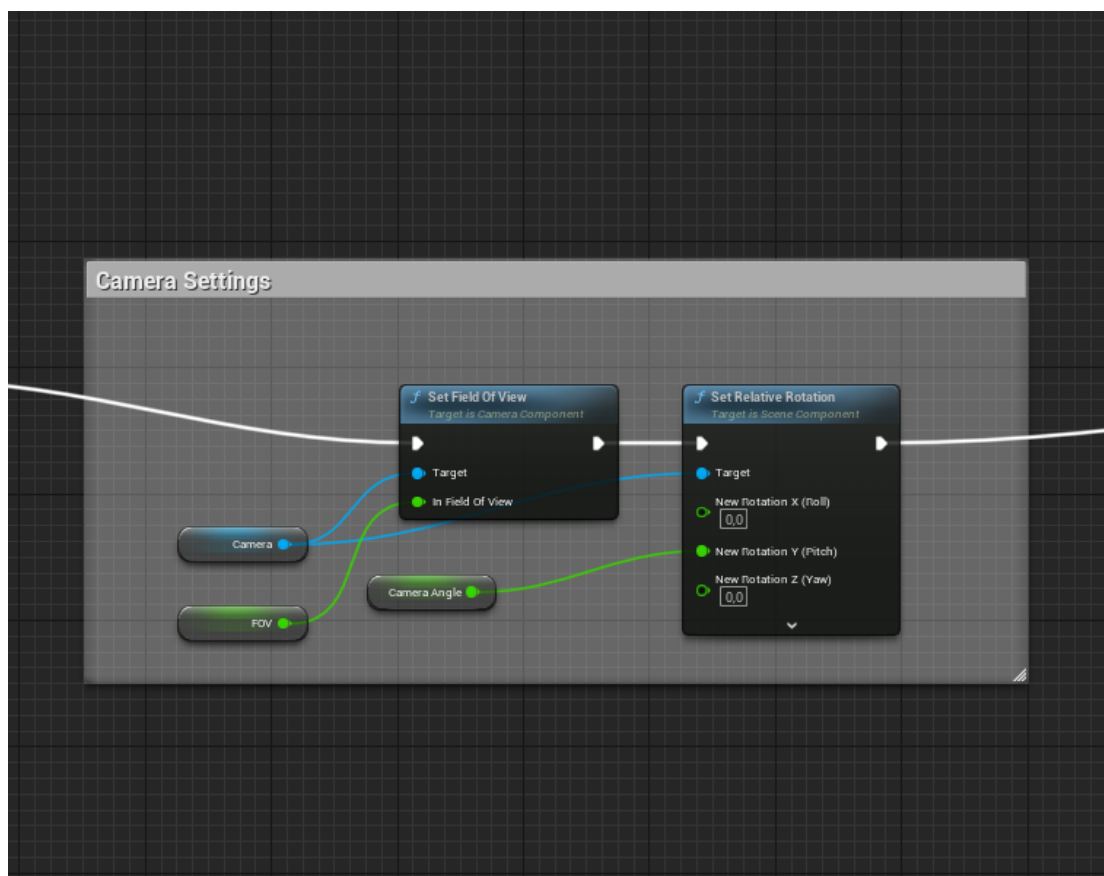


Рисунок 3.12 – Схема роботи Blueprints компоненту Camera Settings

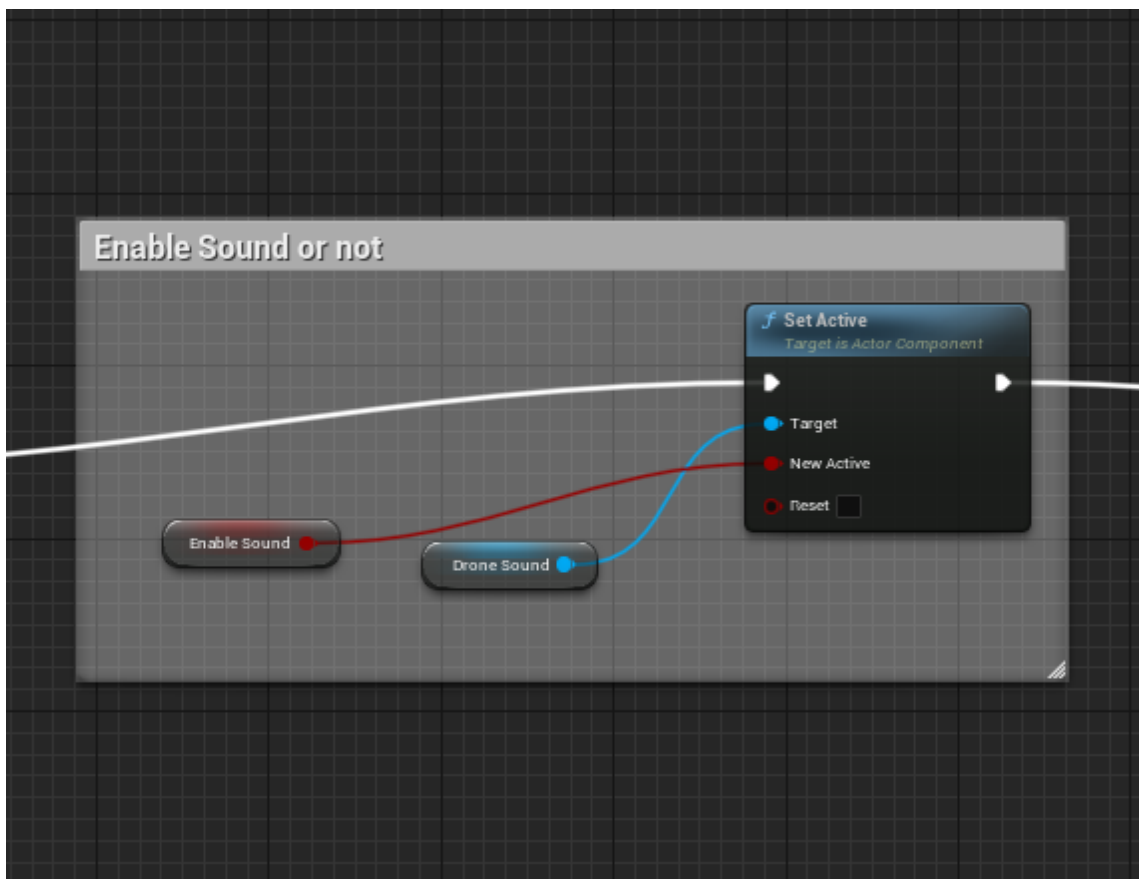


Рисунок 3.13 – Схема роботи Blueprints компоненту Enable Sound or not

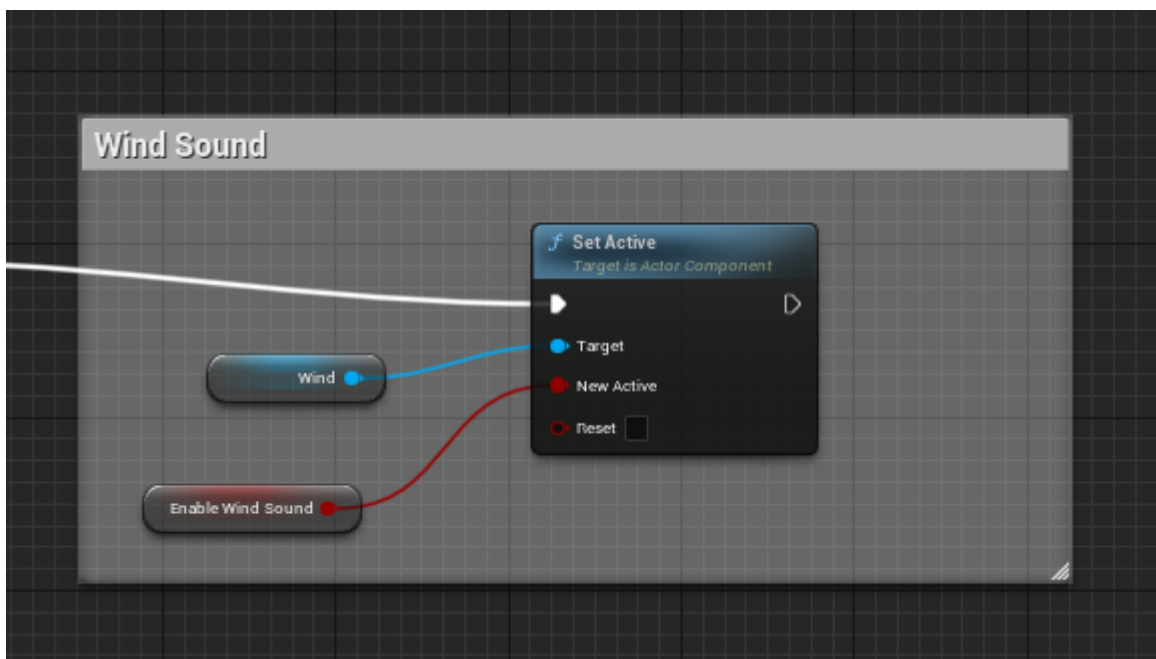


Рисунок 3.14 – Схема роботи Blueprints компоненту Wind Sound

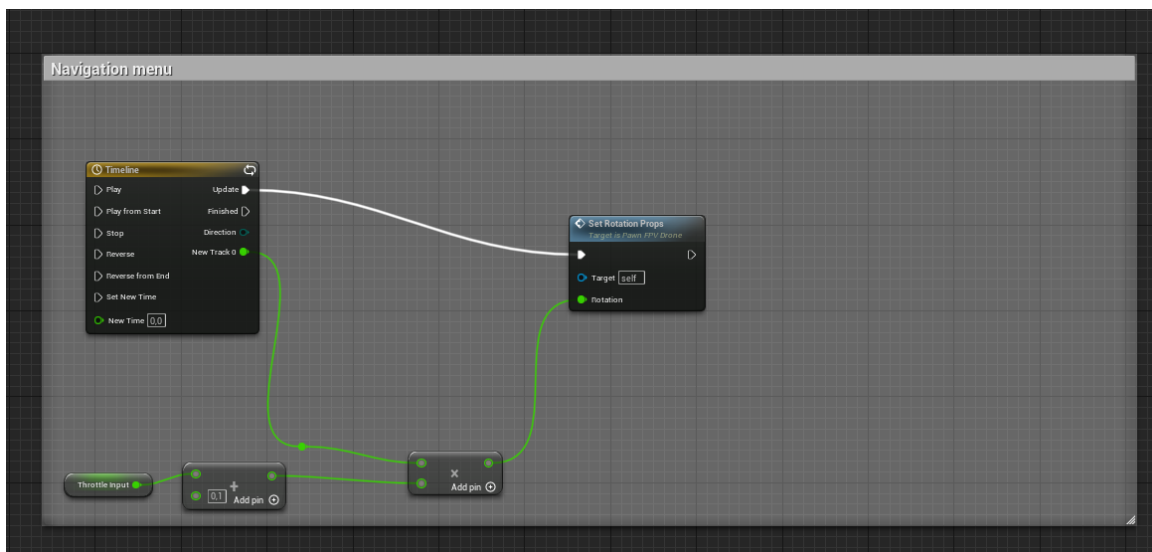


Рисунок 3.15 – Схема роботи Blueprints компоненту Navigation menu

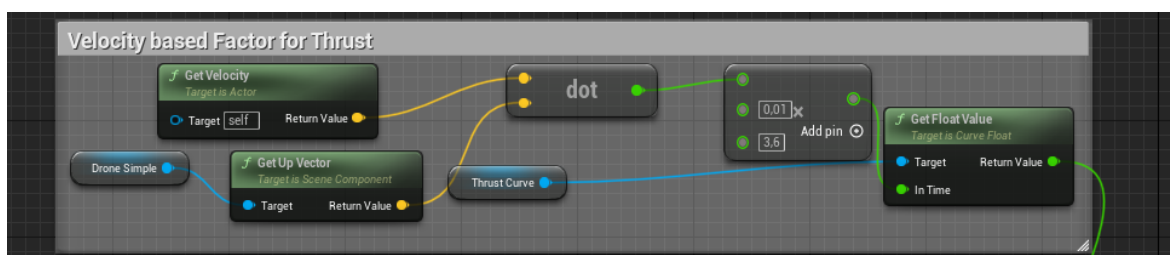


Рисунок 3.16 – Схема роботи Blueprints компоненту Velocity based Factor for Thrust.

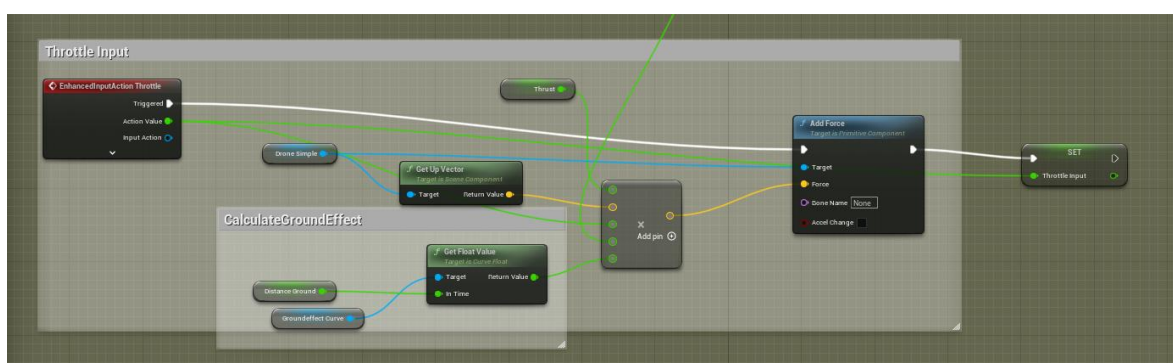


Рисунок 3.17 – Схема роботи Blueprints компонентів Velocity Throttle Input та CalculateGroundEffect

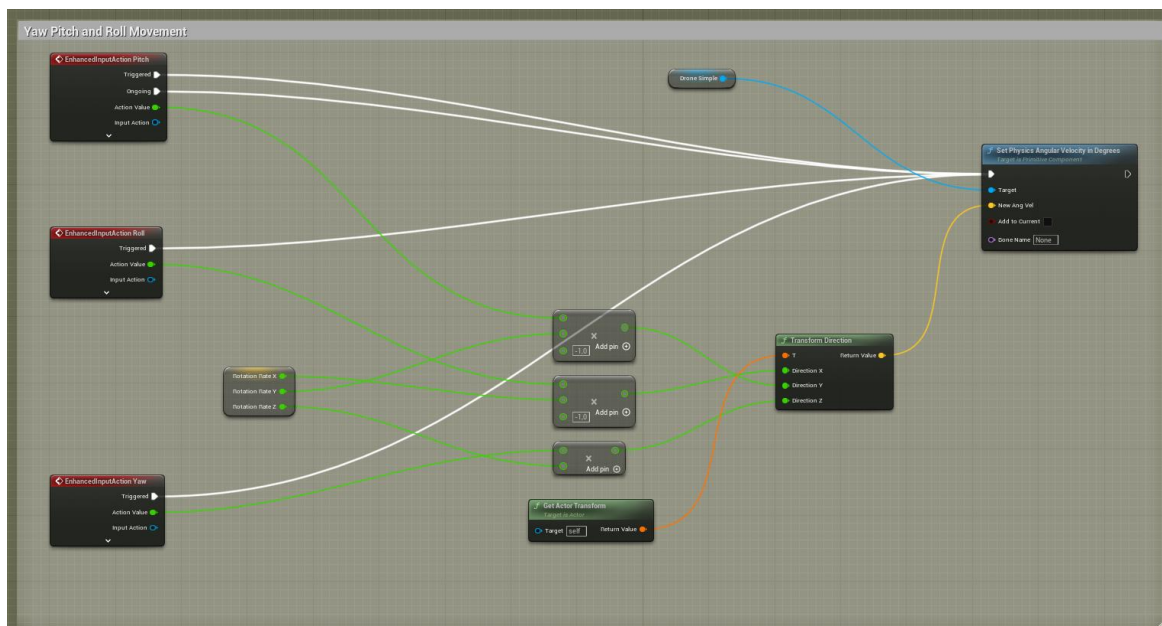


Рисунок 3.18 – Схема роботи Blueprints компоненту Yaw Pitch and Roll Movement.

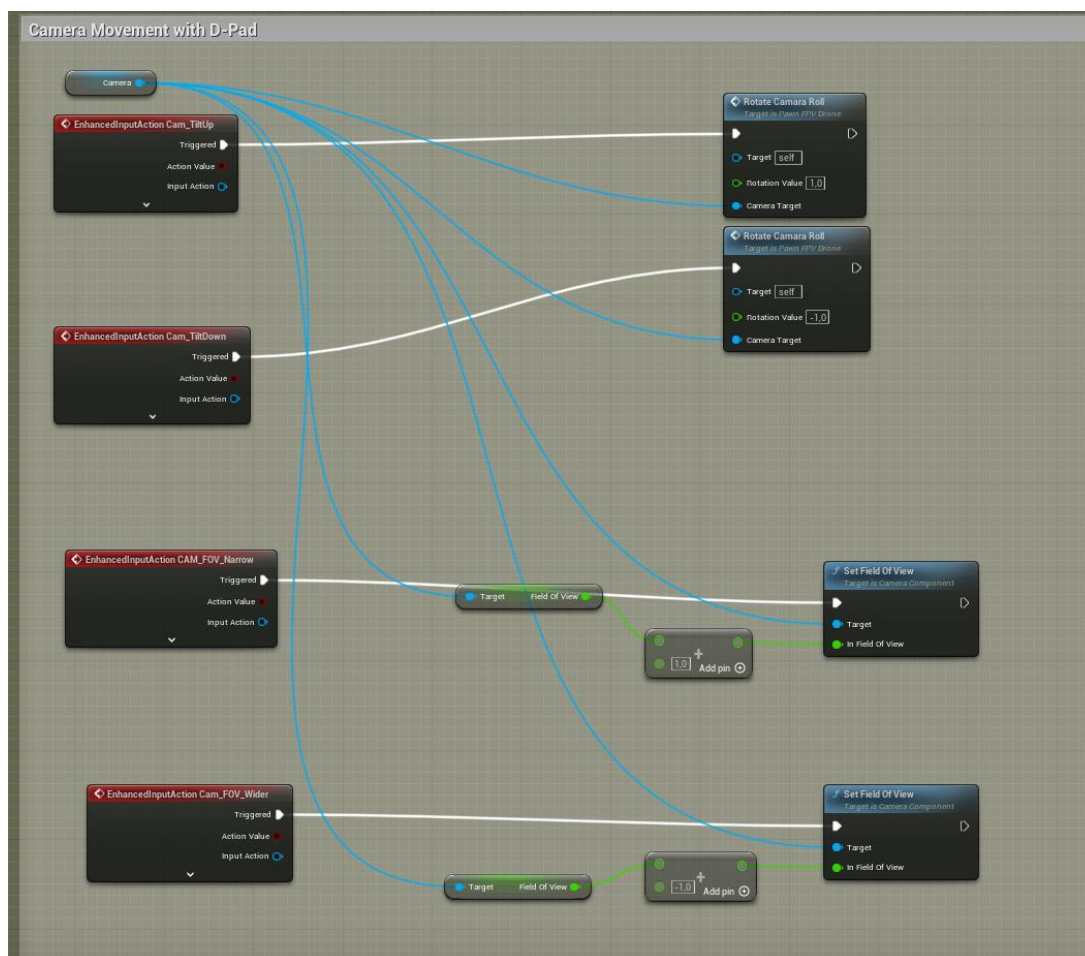


Рисунок 3.19 – Схема роботи Blueprints компоненту Camera Movement with D-Pad.

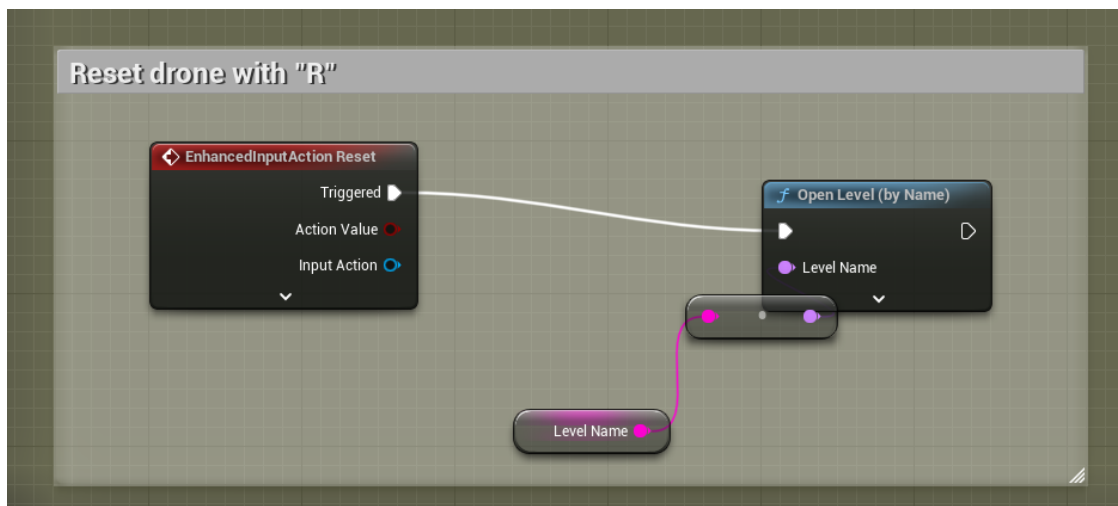


Рисунок 3.20 – Схема роботи Blueprints компоненту Reset drone with «R».

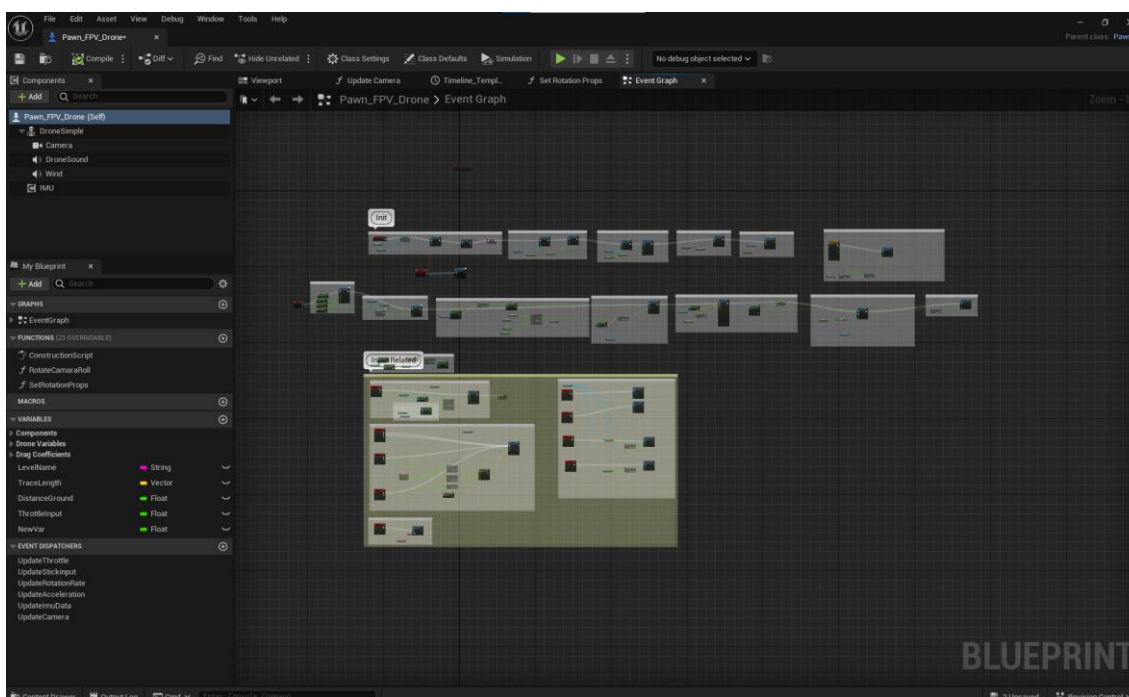


Рисунок 3.21 – Загальна схема роботи дрону у Blueprints

Підтримка VR та AR технологій необхідна для навчання. Оскільки симулятор спрямований на надання іммерсивного досвіду, підтримка віртуальної та доповненої реальності є ключовим фактором. Unreal Engine надає високоякісну підтримку VR/AR, що дозволяє створювати занурювальні та інтерактивні навчальні досвіди. Тому були розроблені версії симулятора як для смартфона та шолома віртуальної реальності, призначеної для мобільних пристроїв, так і для самостійних шоломів віртуальної реальності. Приклад використання шолома віртуальної реальності при керуванні FPV дронам зображено на рисунку 3.22.



Рисунок 3.22 – Приклад використання шолома віртуальної реальності при керуванні FPV дроном.

Спільнота та ресурси: Наявність великої та активної спільноти, а також багатий набір навчальних матеріалів і ресурсів, робить Unreal Engine привабливим вибором для розробників усіх рівнів.

3.2 Розробка інтерфейсу користувача та взаємодії в симуляторі

Розробка інтерфейсу користувача (UI) та взаємодії в симуляторі є фундаментальним аспектом, який забезпечує зручність та інтуїтивність у використанні програми. Основні напрямки роботи над UI включали:

Дизайн користувацького інтерфейсу: Розробка UI, який відображає всі критично важливі інформаційні панелі, такі як швидкість польоту, висота, кути нахилу дрона, стан батареї, GPS-координати, та інші важливі показники. Це вимагало створення зрозумілих візуальних елементів, які б надавали користувачам необхідну інформацію без перевантаження інтерфейсу.

Система управління була спроектована таким чином, щоб імітувати реальні контролери управління FPV дроном. Симулятор дає можливість керування дроном трьома різними способами – за допомогою клавіатури, ігрового контролера або RC (професійного) контролера. Важливо було досягти балансу між реалістичністю та спрощенням для тих, хто вперше стикається з управлінням дрона. На рисунку 3.23 зображено приклад керування FPV дроном за допомогою ігрового контролера DualShock 4.



Рисунок 3.21 – Приклад керування FPV дроном.

Інтеграція зворотного зв'язку та підказок є також необхідним кроком. Забезпечення користувачам відповідних підказок та зворотного зв'язку важливо для процесу навчання. Це включало розробку системи попереджень та порад, які допомагають користувачам уникати помилок під час польоту та вчаться на основі своїх дій.

3.3 Тестування, валідація та оптимізація симулятора

Фінальний етап проекту полягав у тестуванні та оптимізації симулятора для забезпечення його надійності, ефективності та реалістичності польотного досвіду. Методологія тестування полягала у розробці комплексної стратегії тестування, яка включала як автоматизовані тести окремих компонентів системи, так і ручні тести для оцінки загального досвіду користувачів. Використання різних форм тестування, включаючи юніт-тестування, інтеграційне тестування та приймальне тестування, дозволило виявити та виправити помилки на ранніх етапах розробки.

Перевірка точності та реалістичності симулятора стало можливим через порівняння його поведінки з реальними даними польотів дронів. Це включало аналіз відповідності між симульованими польотними характеристиками та реальними польотними даними.

Оптимізація продуктивності та користувацького досвіду було виконано за допомогою регулярного оновлення симулятора. Через це відбулося підвищення його продуктивності, стабільності та зручності використання. Врахування зворотного зв'язку від користувачів для вдосконалення інтерфейсу, функціональності та загального досвіду користування.

Залучення кінцевих користувачів для отримання безпосереднього зворотного зв'язку було ключовим у процесі тестування. Це дозволило отримати цінну інформацію про інтуїтивність інтерфейсу, якість візуалізації, реалістичність симуляції польоту, та загальне враження від використання симулятора. Отримані дані були використані для внесення коректив у дизайн та функціональність симулятора.

Постійна ітерація та вдосконалення стали невід'ємними супутниками у ході створення додатку. Розробка симулятора була процесом постійного вдосконалення, де кожен етап тестування та зворотного зв'язку вносив свій вклад у поліпшення продукту. Особлива увага приділялася оптимізації продуктивності для забезпечення плавного та стабільного досвіду використання, особливо важливого для VR та AR застосунків.

ВИСНОВКИ

У рамках кваліфікаційної роботи був розроблений і реалізований симулятор, що відтворює процес управління FPV дроном у віртуальному середовищі. Цей проект є значущим кроком у розвитку технологій віртуального пілотування, відкриваючи нові можливості для навчання та вдосконалення навичок пілотування без ризиків для реальних дронів або навколишнього середовища.

Завдяки використанню Unreal Engine вдалося створити високодеталізоване та реалістичне віртуальне середовище, яке імітує реальні умови польоту. Математичне моделювання динаміки польоту дрона дозволило точно відтворити його поведінку, що є ключовим для ефективного навчання та розвитку навичок пілотування.

Інтерфейс користувача було розроблено з урахуванням зручності та інтуїтивності управління, а також забезпечено наявність всіх необхідних інформаційних панелей для моніторингу стану дрона та навколишнього середовища. Система управління оптимізована для точного та відгукового керування, що дозволяє користувачам ефективно навчатися та вдосконалювати свої навички.

Тестування та валідація симулятора підтвердили його високу ефективність та реалістичність, відкриваючи шлях для його використання як в освітніх цілях, так і для професійного тренування пілотів. Оптимізація продукту, заснована на зворотному зв'язку від користувачів, дала можливість покращити його функціональність та користувацький досвід.

У заключній частині роботи акцентується на значенні розробленого симулятора для галузі FPV пілотування та можливостях його подальшого розвитку і адаптації до специфічних потреб і сценаріїв використання. Розроблений симулятор не лише є важливим освітнім інструментом, але й відіграє ключову роль у популяризації та безпечному розвитку FPV пілотування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Творошенко, І. С. (2021). Технології прийняття рішень в інформаційних системах: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ.
2. Гороховатський В.О., Творошенко І.С. (2022) Аналіз багатовимірних даних за описом у формі множини компонент: монографія. Харків: ХНУРЕ, 124 с.
3. Campbell, J., & Fraser, M. (2019). Cartright: maintaining good posture in the presence of adaptive haptics. In Proceedings of the 31st European Conference on Cognitive Ergonomics, 148–155. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3335082.3335088> (дата звернення 09.10.2023).
4. Daradkeh, Y.I., Tvoroshenko, I., Gorokhovatskyi, V., Latiff, L.A., and Ahmad, N. (2021) Development of Effective Methods for Structural Image Recognition Using the Principles of Data Granulation and Apparatus of Fuzzy Logic, *IEEE Access*, 9, pp. 13417-13428.
5. Campbell, J., & Fraser, M. (2019). Switching it up: designing adaptive interfaces for virtual reality exergames. In Proceedings of the 31st European Conference on Cognitive Ergonomics, 177–184. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3335082.3335087> (дата звернення 14.10.2023).
6. Bak, S., Carr, P., & Lalonde, J.-F. (2018). Domain adaptation through synthesis for unsupervised person re-identification. CoRR. URL: <http://arxiv.org/abs/1804.10094> (дата звернення 14.10.2023).
7. Bock, M., & Schreiber, A. (2018). Visualization of neural networks in virtual reality using Unreal Engine. In Proceedings of the 24th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3281505.3281605> (дата звернення 04.10.2023).
8. Bondi, E., Kapoor, A., Dey, D., Piavis, J., Shah, S., Hannaford, R., Iyer, A., Joppa, L., & Tambe, M. (2018). Near real-time detection of poachers from drones in AirSim. In Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence. International Joint Conferences on Artificial Intelligence

Organization. URL: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2018/847> (дата звернення 14.10.2023).

9. Bondi, E., Dey, D., Kapoor, A., Piavis, J., Shah, S., Fang, F., Dilkina, B., Hannaford, R., Iyer, A., Joppa, L., & Tambe, M. (2018). AirSim-W: a simulation environment for wildlife conservation with UAVs. In Proceedings of the 1st ACM SIGCAS Conference on Computing and Sustainable Societies. ACM. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3209811.3209880> (дата звернення 28.09.2023).

10. Campbell, J., Hogan, T., & Fraser, M. (2018). Feeling virtual worlds: an exploration into coupling virtual and kinaesthetic experiences. In Proceedings of the Twelfth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. Association for Computing Machinery. URL: <https://doi.org/10.1145/3173225.3173281> (дата звернення 14.10.2023).

11. Carrio, A., Vemprala, S., Ripoll, A., Saripalli, S., & Campoy, P. (2018). Drone detection using depth maps. CoRR. URL: <http://arxiv.org/abs/1808.00259> (дата звернення 14.10.2023).

12. Airsim documentation (airsim-fork.readthedocs.io). URL: <https://airsim-fork.readthedocs.io/en/docs/> (дата звернення 02.10.2023).

13. GitHub - dronesimulator/Colosseum: Open source simulator for autonomous robotics built on Unreal Engine with support for Unity (github.com). URL: <https://github.com/dronesimulator/Colosseum> (дата звернення 10.10.2023).

14. Realistic drone simulation (completely Blueprint based) - Programming & Scripting - Epic Developer Community Forums (forums.unrealengine.com). URL: <https://forums.unrealengine.com/t/realistic-drone-simulation-completely-blueprint-based/101098> (дата звернення 01.10.2023).

15. Core APIs - AirSim (microsoft.github.io). URL: https://microsoft.github.io/AirSim/core_apis/ (дата звернення 29.09.2023).

16. Developer Creates a Realistic FPV Drone Simulation inside Unreal Engine (hitmarker.net). URL: <https://hitmarker.net/news/developer-creates-a-realistic-fpv-drone-simulation-inside-unreal-engine-2259649> (дата звернення 29.09.2023).

17. Sitnikov D., Olena T., Sergii M., Andrii K., Serhii T. (2018) Informativity of association rules from the viewpoint of information theory, 79(10), pp. 595-598