

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерних наук
Кафедра Медіасистеми та технології
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютерні технології
та системи видавничо-поліграфічних виробництв
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри МСТ _____
(підпис)

« 18 » листопада 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Сахарову Івану Леонідовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження і розробка компонентів AR-додатка примірки речей

затверджена наказом по університету від _____ 8 листопада 2024 р. № 1188 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 10 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи

Додаток доповненої реальності примірки речей; Методи оптимізації 3D моделей;
Рекомендації з покращення технології розробки AR-додатків.


4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ; Огляд сучасного стану проблеми; Вибір та обґрунтування інструментів реалізації
мети дослідження; Розробка AR-додатка; Вибір методів та виконання оптимізації 3D
моделей; Рекомендації з покращення технології розробки AR-додатків; Експериментальне
дослідження; Економічна частина; Висновки.

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

Каталог додатка GivAR

6. Консультанти розділів роботи


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	проф. Кулішова Н.Є.		02.01.2025
Економічна частина	ас. Помогалова Н.В.		30.12.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання кваліфікаційної роботи	18.11.2024	виконано
2	Дослідження матеріалів та наукових робіт	25.11.2024	виконано
3	Постановка задачі	29.11.2024	виконано
4	Розробка програмного забезпечення	05.12.2024	виконано
5	Планування експериментальної частини дослідження	13.12.2024	виконано
6	Проведення експериментів	20.12.2024	виконано
7	Економічна частина	27.12.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	02.01.2025	виконано
9	Оформлення графічної частини	07.01.2025	виконано

Дата видачі завдання 18 листопада 2024 р.

Здобувач



Сахаров І.Л.

(підпис)

Керівник роботи



проф. Кулішова Н.Є.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 73 с., 14 табл., 29 рис., 2 дод., 31 джерело.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ, ВЕБ-ДОДАТОК, ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, AR, 3D МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПРИМІРКА, ВЗУТТЯ, АКСЕСУАРИ, DEEPAR.

Мета роботи – підвищення продуктивності AR-додатків та покращення якості віртуальної примірки шляхом оптимізації 3D моделей, що забезпечить користувачам зручний і ефективний досвід взаємодії.

Об'єктом дослідження є технології доповненої реальності.

Предметом дослідження є методи оптимізації 3D моделей, зокрема, зменшення кількості полігонів і оптимізація текстур та матеріалів.

У результаті роботи проведено аналіз предметної області, що включає в себе детальний опис основної ідеї розроблюваного додатка доповненої реальності для «примірки» речей. Методом лінійної згортки обрано програмне забезпечення для створення та обробки 3D моделей, а також рушій для розробки AR-додатка. За допомогою DeepAR Studio створено ефекти для каталогу з 37 товарів. Реалізовано веб-додаток для «примірки» речей мовами програмування JavaScript та TypeScript, а також DeepAR SDK. Для покращення продуктивності роботи додатка проведена оптимізація 3D моделей за рахунок зменшення кількості полігонів та оптимізації текстур і матеріалів. Сформульовано загальні рекомендації з покращення технології розробки AR-додатків. В економічній частині виконано розрахунок одноразових витрат на розробку науково-дослідної роботи (НДР), визначено оцінку результатів від впровадження НДР та економічну ефективність.

ABSTRACT

Explanation of the qualification work: 73 p., 14 tables., 29 pic., 2 supp., 31 sources.

INFORMATION TECHNOLOGY, WEB APPLICATION, AUGMENTED REALITY, AR, 3D MODEL, OPTIMIZATION, TRY ON, SHOES, ACCESSORIES, DEEPAR.

The purpose of the work is to increase the performance of AR applications and improve the quality of virtual fitting by optimizing 3D models, which will provide users with a convenient and efficient interaction experience.

The subject of the research is augmented reality technologies.

The research focuses on methods for optimizing 3D models, in reducing the number of polygons and optimizing textures and materials.

As a result of the work, the subject area was analyzed, including a detailed description of the main idea of the augmented reality application being developed for «trying on» items. The linear convolution method was used to select software for creating and processing 3D models, as well as an engine for developing an AR application. DeepAR Studio was used to create effects for a catalog of 37 products. A web application for «trying on» items was implemented using the JavaScript and TypeScript programming languages and the DeepAR SDK. To improve the performance of the application, the 3D models were optimized by reducing the number of polygons and optimizing textures and materials. General recommendations for improving the technology of AR application development are formulated. In the economic part, the one-time cost of developing a research and development (R&D) work were calculated, the evaluation of the results of R&D implementation and economic efficiency were determined.

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	8
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ	11
1.1 Аналіз предметної області магістерського дослідження, особливості та проблеми, які є предметом дослідження.....	11
1.2 Огляд існуючих аналогів.....	12
1.3 Перспективи ринку	16
1.4 Постановка задачі.....	17
2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	18
2.1 Вибір програмного забезпечення для роботи з 3D моделями.....	18
2.2 Вибір рушія розробки додатка доповненої реальності	23
3 РОЗРОБКА AR-ДОДАТКА.....	29
3.1 Розробка вимог до інтерфейсу клієнтської частини системи.....	29
3.2 Типова розробка додатків доповненої реальності.....	30
3.3 Архітектура розроблюваного AR-дodatка	33
3.4 Реалізація застосунка «примірки» речей	36
3.4.1 Розробка DeerAR ефектів	36
3.4.2 Підключення DeerAR до розроблюваного додатка	37
4 ВИБІР МЕТОДІВ ТА ВИКОНАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ 3D МОДЕЛЕЙ	40
4.1 Вплив та важливість оптимізації 3D моделей в AR-дodatках	40
4.2 Оптимізація 3D моделей методом зменшення кількості полігонів	41
4.3 Оптимізація 3D моделей методом оптимізації текстур і матеріалів	46
5 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ AR-ДОДАТКІВ.....	53
6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	56
7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	60
7.1 Характеристика науково-дослідної роботи.....	60
7.2 Характеристика науково-дослідної роботи.....	60

7.3 Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР.....	62
7.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи.....	65
7.5 Визначення економічної ефективності результатів НДР	68
ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	71
ДОДАТОК А Каталог додатка GivAR	74

ВСТУП

У XXI столітті технологічний прогрес характеризується безпрецедентною швидкістю та масштабами, що значно трансформує різні аспекти повсякденного життя. Щорічно з'являються нові технології, які не лише поліпшують якість життя, але й створюють нові можливості для особистісного та професійного розвитку. Однією з найперспективніших технологій, що демонструє значний потенціал, є доповнена реальність (augmented reality, AR). Ця технологія не лише викликає зацікавленість у фахівців, але й активно впроваджується у різних галузях.

Доповнена реальність визначається як інтеграція віртуальних елементів у реальний світ, що дозволяє користувачам взаємодіяти з інформацією, яка доповнює їхнє сприйняття навколишньої дійсності. На сьогодні AR активно застосовується в освітніх закладах, архітектурі, медицині, рекламі, а також в ігровій індустрії. Наприклад, у навчальних процесах студенти можуть використовувати AR для візуалізації складних концепцій, таких як анатомічні структури, що робить навчання більш інтерактивним і зрозумілим. Це підвищує зацікавленість студентів і покращує засвоєння матеріалу [2-3].

Принцип роботи AR-додатків ґрунтується на використанні спеціальних міток, які розпізнаються мобільними пристроями або комп'ютерами. Коли пристрій фіксує мітку, на екрані з'являється додатковий шар інформації, що може бути візуальним, звуковим або тактильним. Таке представлення даних дозволяє користувачам отримувати нові враження і взаємодіяти з об'єктами, що раніше були недоступні. Цей процес не лише збільшує залученість користувачів, але й надає їм можливість отримувати додаткову інформацію в реальному часі.

Дослідження показують, що доповнена реальність стала важливим інструментом у сфері роздрібної торгівлі та комерції. Багато компаній використовують AR для створення інтерактивного досвіду, що дозволяє

споживачам здійснювати покупки в новий, унікальний спосіб. Наприклад, деякі роздрібні мережі пропонують можливість віртуально приміряти одяг або взуття, що зменшує ризик невдалих покупок. Це підвищує впевненість споживачів у своїх рішеннях і може призвести до збільшення обсягів продажів. Такі рішення не тільки покращують споживчий досвід, але й допомагають компаніям підвищити свою конкурентоспроможність на ринку.

Важливим аспектом розвитку AR є її інтеграція у маркетингові стратегії компаній. Бренди використовують доповнену реальність для створення інтерактивних рекламних кампаній, які здатні привернути увагу споживачів. Наприклад, AR-додатки можуть пропонувати віртуальні тури по магазинах, демонструвати функції продуктів або проводити інтерактивні акції. Це створює нові можливості для взаємодії між брендом і споживачем, що, у свою чергу, сприяє зміцненню лояльності до бренду [4-5].

Наразі доповнена реальність продовжує активно розвиватися, і її потенціал залишається далеко не вичерпаним. Як стартапи, так і великі технологічні компанії, такі як Apple і Google, займаються дослідженнями у цій сфері. Зростання потужності мобільних пристроїв і розширення доступу до високошвидкісного Інтернету забезпечують AR більшу доступність для широкого кола користувачів. Це створює нові можливості для бізнесу, розширюючи горизонти електронної комерції та змінюючи способи, якими споживачі взаємодіють із товарами та послугами [6].

Однак, для успішного функціонування AR-додатків важливо враховувати оптимізацію 3D моделей. Це питання є критично важливим для забезпечення продуктивності додатків і загального користувацького досвіду. Погано оптимізовані моделі можуть призвести до зниження частоти кадрів, збільшення часу завантаження та погіршення якості роботи, що негативно вплине на сприйняття додатку. Таким чином, розробникам важливо приділяти належну увагу цим аспектам, оскільки якісний продукт здатен зацікавити та утримати споживачів.

Мета роботи полягає в підвищенні продуктивності AR-додатків та покращенні якості віртуальної примірки шляхом оптимізації 3D моделей, що забезпечить користувачам зручний і ефективний досвід взаємодії. Це передбачає аналіз існуючих технологій та підходів, які можуть бути використані для вдосконалення процесу розробки.

Об'єктом дослідження виступають технології доповненої реальності.

Предметом дослідження є методи оптимізації 3D моделей, зокрема, зменшення кількості полігонів і оптимізація текстур та матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає у можливості інтеграції запропонованих рішень у різні системи електронної комерції, що сприятиме спрощенню процесу онлайн-покупок. Цей підхід дозволить не лише підвищити зручність для користувачів, але й збільшити ефективність продажів для компаній, які готові впроваджувати інновації.

Таким чином, доповнена реальність має потенціал змінити підходи до споживання товарів і послуг, створюючи нові враження та можливості для бізнесу. Технології AR можуть стати невід'ємною частиною повсякденного життя, змінюючи способи взаємодії з навколишнім світом.

Результати дослідження опубліковано у збірнику матеріалів молодіжної школи-семінару IX Міжнародної науково-технічної конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології» (PMW-2024) у м. Харків [8].

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз предметної області магістерського дослідження, особливості та проблеми, які є предметом дослідження

Доповнена реальність (AR) стає дедалі важливішим інструментом у сфері електронної комерції, оскільки вона значно покращує досвід покупців. В умовах зростаючої конкуренції, AR дозволяє брендам запропонувати інтерактивні та персоналізовані рішення, що сприяють більшій залученості споживачів. Завдяки можливості візуалізувати продукцію в реальному середовищі, покупці можуть приймати обґрунтовані рішення, що зменшує ризик невдалих покупок і повернень. Таким чином, впровадження AR в електронну комерцію не лише підвищує рівень задоволеності клієнтів, але й сприяє збільшенню продажів та зміцненню брендової лояльності.

В цій роботі передбачається розробка веб-додатка GivAR, який дозволяє користувачам «приміряти» речі в режимі реального часу, не виходячи з дому. Це означає, що замість того, щоб фізично відвідувати магазин, клієнти зможуть взаємодіяти з продуктами у зручному для них середовищі. Додаток використовує технології доповненої реальності, що дозволяє детально переглядати товари з будь-якого кута, надаючи можливість оцінити їхній вигляд та стиль у звичних умовах.

Основна ідея сервісу полягає в тому, що він:

- забезпечує швидкий і зручний інтерфейс для користувачів;
- дозволяє виконувати «примірку» товарів у реальному часі;
- пропонує доступ до широкого каталогу, який включає сумки, взуття, ювелірні вироби, головні убори та окуляри;
- швидко завантажує 3D моделі товарів, забезпечуючи миттєвий доступ до візуалізації.

У AR-додатках розмір файлу 3D моделі є критично важливим фактором, оскільки він безпосередньо впливає на продуктивність програми

та ефективність використання ресурсів на різних пристроях. Великі обсяги даних можуть призводити до затримок у завантаженні, зниження якості візуалізації та загального погіршення користувацького досвіду.

Предметом розробки є методи оптимізації 3D моделей. Це є актуальним, оскільки дозволяє забезпечити баланс між якістю зображення та швидкістю роботи додатка, що є особливо важливим для досягнення високої продуктивності на мобільних пристроях та інших платформах.

1.2 Огляд існуючих аналогів

Серед існуючих аналогів можна виділити такі системи, як Wanna Kicks, Pictofit Shopping та The Dessy Group.

Wanna Kicks є мобільним додатком, що реалізує концепцію доповненої реальності, дозволяючи користувачам «приміряти» кросівки від провідних брендів без необхідності фізичного відвідування магазину. Ця програма створює реалістичну симуляцію, яка допомагає споживачам оцінити, як конкретна модель виглядатиме на їхніх ногах. Завдяки інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, процес використання Wanna Kicks є простим і зручним: користувач може вибрати будь-яку пару кросівок з великого асортименту, навести камеру на свої стопи, і миттєво побачити, як обрана модель виглядає в реальному часі.

Асортимент кросівок у Wanna Kicks містить моделі від таких відомих брендів, як Gucci, Nike, Adidas, Puma, Dior та Yeezy. Це дає користувачам можливість знайти ідеальну пару для будь-якої нагоди, будь то спортивні тренування чи повсякденний стиль. Користувачі можуть безпосередньо з додатку здійснювати покупки, що спрощує процес вибору і покупки кросівок.

Крім того, кожна модель має окрему сторінку, на якій міститься корисна інформація про характеристику взуття, а також посилання на офіційний сайт бренду. Це дозволяє користувачам отримувати детальну

інформацію про товар, що значно підвищує рівень інформованості при прийнятті рішення про покупку. У результаті, Wanna Kicks не лише покращує досвід примірки, але й робить процес покупки більш приємним і ефективним [9].

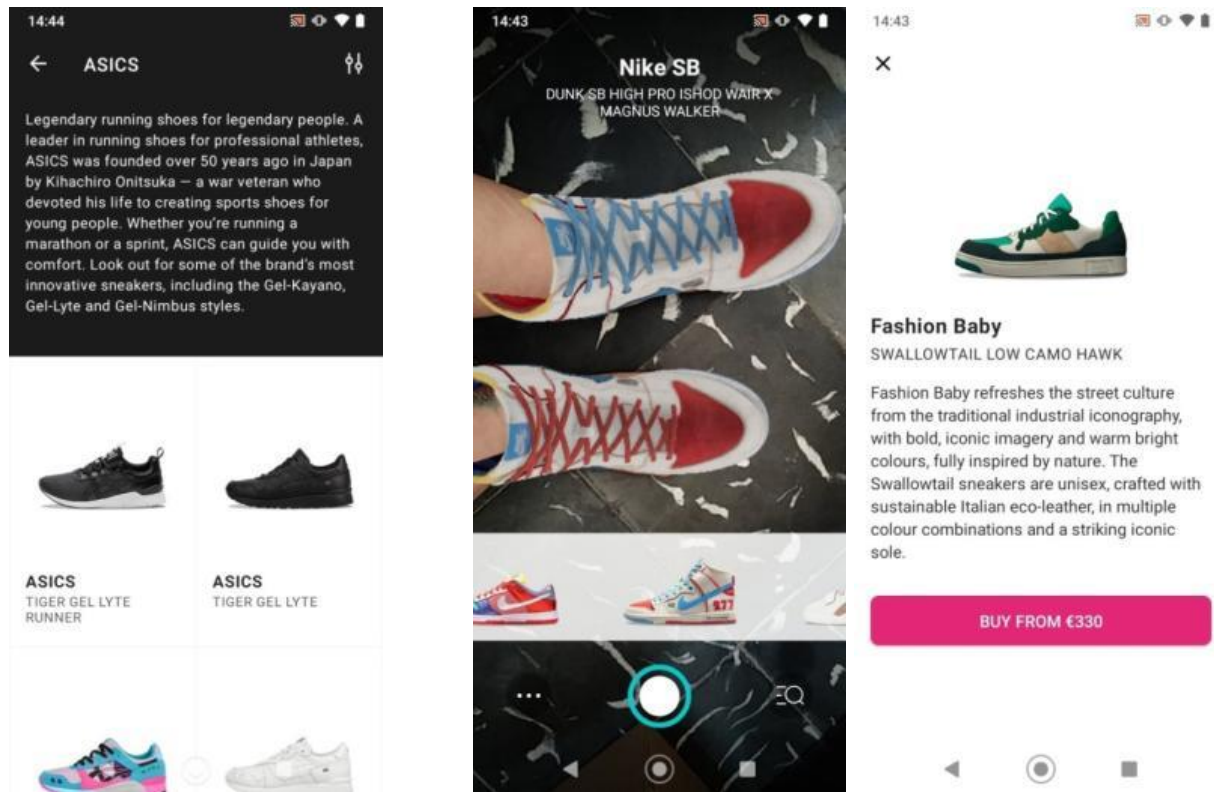


Рисунок 1.1 – Скріншоти роботи мобільного додатка «Wanna Kicks»

Pictofit Shopping є інноваційним інструментом, розробленим компанією Reactive Reality, який використовує технології доповненої реальності (AR) для революціонізації процесу покупок. Цей додаток дозволяє користувачам створювати надточні онлайн-аватари, що точно відображають форму та розміри їхнього тіла. Важливо зазначити, що Pictofit Shopping працює більше як 2D-інструмент, ніж як 3D, що забезпечує простоту у використанні, дозволяючи споживачам «приміряти» одяг віртуально, перш ніж ухвалити рішення про його покупку. Це значно зменшує ймовірність невдалих придбань [10].

Pictofit Shopping можна легко інтегрувати з різними платформами електронної комерції, що робить його універсальним рішенням для онлайн-магазинів. Користувачі можуть переглядати широкий каталог одягу, використовуючи свої віртуальні аватари, щоб оцінити, як обрані речі виглядатимуть на них у реальному житті. Це не лише полегшує процес вибору, але й підвищує рівень задоволеності клієнтів, оскільки вони можуть з упевненістю визначити, який одяг їм підходить найкраще.

Додаток забезпечує інтерактивний досвід, який допомагає користувачам більш усвідомлено підходити до вибору одягу. Таким чином, Pictofit Shopping стає не просто інструментом для шопінгу, а й важливим елементом у зміні сприйняття онлайн-покупок, пропонуючи новий рівень зручності та персоналізації [11].

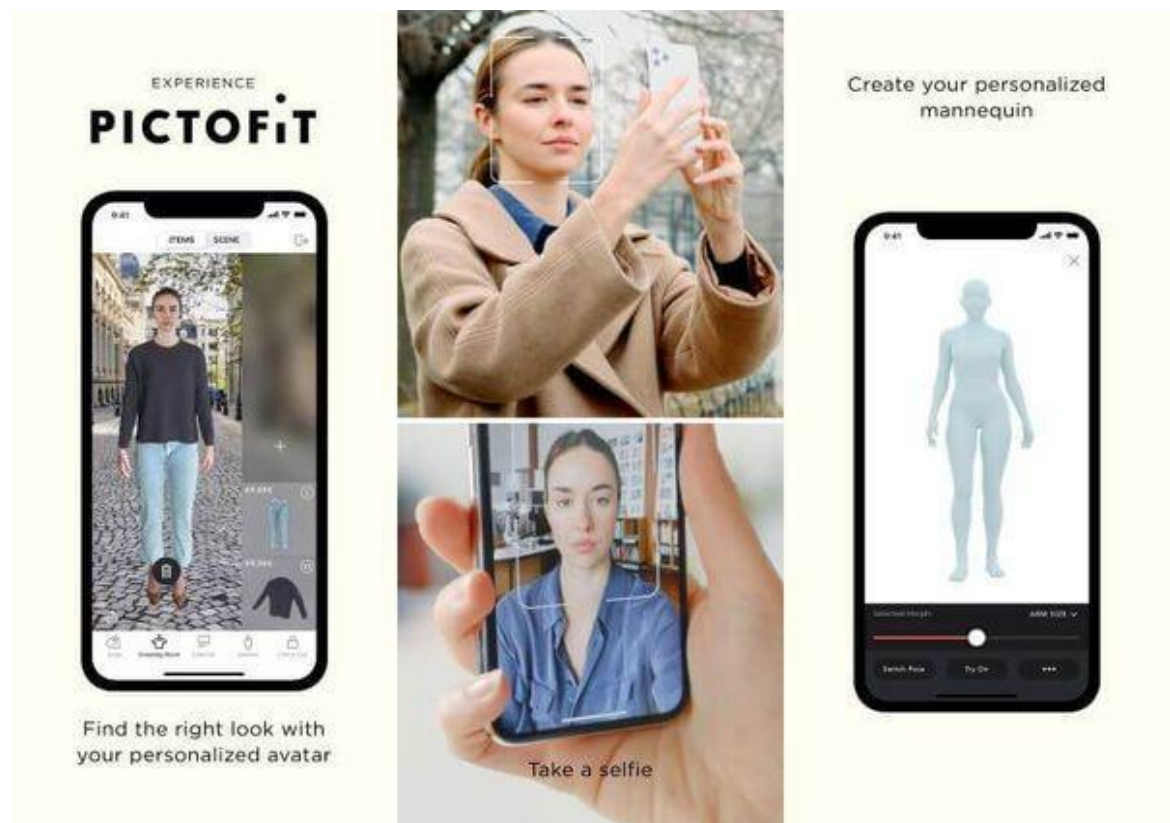


Рисунок 2.2 – Скріншоти роботи інструмента «Pictofit Shopping»

Додаток Warby Parker впроваджує технологію доповненої реальності для віртуального приміряння окулярів, що значно спрощує та покращує

процес вибору. Користувачі можуть завантажити додаток на свій смартфон і за допомогою вбудованої камери оцінити, як різні моделі окулярів виглядають на їхньому обличчі [13].

Додаток пропонує широкий асортимент стилів і кольорів, що дозволяє легко порівнювати варіанти та знайти оптимальне рішення, не виходячи з дому. Ця функція особливо корисна в умовах сучасного життя, де зручність і швидкість стали важливими критеріями при виборі товарів. Віртуальне приміряння не лише заощаджує час, а й дозволяє користувачам експериментувати з новими стилями, що підвищує впевненість у виборі. Таким чином, додаток Warby Parker стає потужним інструментом для споживачів, які шукають окуляри, адаптуючи традиційний процес шопінгу до сучасних технологічних реалій [12].

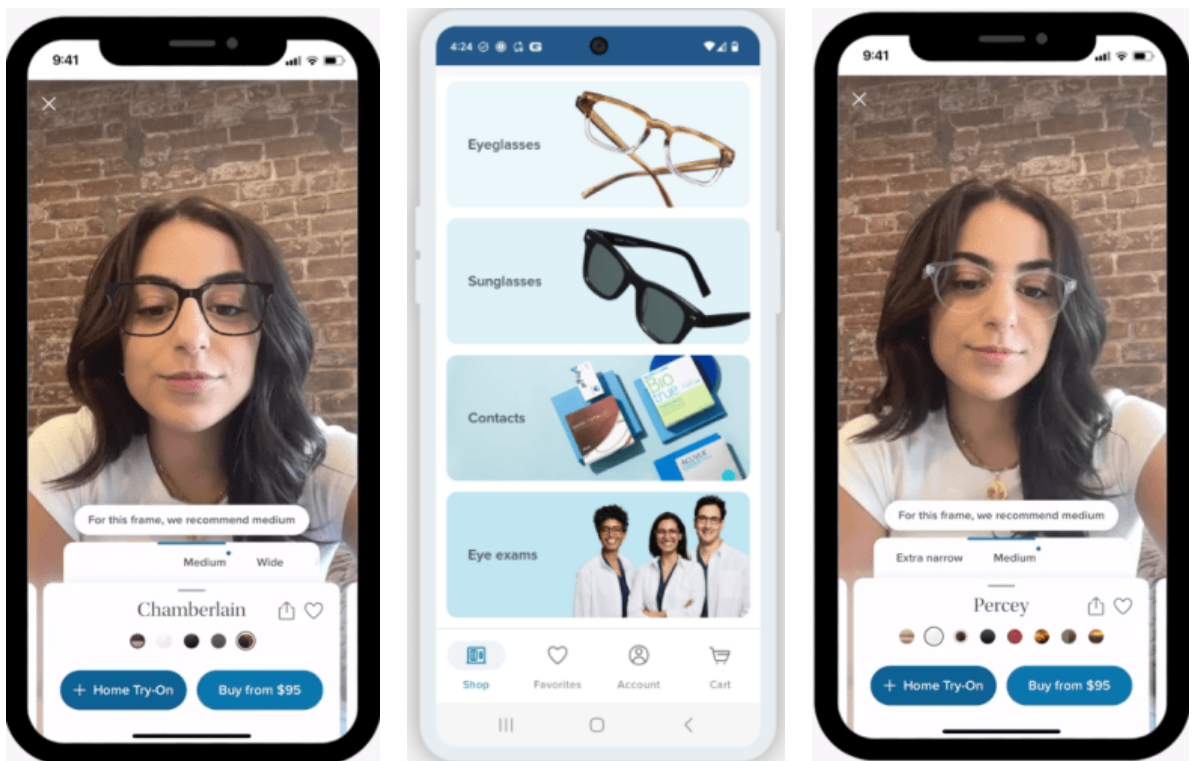


Рисунок 2.3 – Скріншоти роботи додатка «Warby Parker»

В цілому, додаток Warby Parker є значним інструментом для онлайн-придбання окулярів, проте перед остаточним вибором рекомендується проводити фізичне приміряння.

Кожен аналог має свої переваги і недоліки. Таблиця 1.1 демонструє порівняльний аналіз можливостей існуючих аналогів з розроблювальним веб-додатком GivAR.

Таблиця 1.1 – Аналіз та порівняння програмних аналогів з GivAR

Характеристика	Wanna Kicks	Pictofit Shopping	Warby Parker	GivAR
Приємний та зручний інтерфейс	+	+	+	+
Підтримка 3D-файлів	+	–	+	+
Підтримка мобільних пристроїв	+	+	+	+
Підтримка десктопних пристроїв	–	–	+	+
Підтримка AR для «примірки»	+	–	+	+
Швидке завантаження речей на «примірку»	+	+	–	+
«Примірка» взуття	+	+	–	+
«Примірка» сумок	–	+	–	+
«Примірка» ювелірних виробів	–	+	–	+
«Примірка» окулярів	–	+	+	+
«Примірка» головних уборів	–	+	–	+

1.3 Перспективи ринку

Ринок електронної комерції демонструє стрімкий розвиток, а кількість користувачів ритейл-платформ постійно зростає. Головною причиною цього зростання є прагнення споживачів мати унікальні та ексклюзивні предмети, які підкреслюють їхню індивідуальність. Однак традиційні магазини часто не можуть задовольнити ці потреби, оскільки їх асортимент обмежений. Придбання ексклюзивних товарів зазвичай вимагає більшої фінансової витрати, а також існує невизначеність щодо того, як новий предмет одягу поєднуватиметься з уже наявними елементами гардеробу.

Рішення, яке пропонує GivAR, вирішує кілька ключових проблем:

- накопичення непотрібного одягу в шафах, що часто призводить до втрати місця та відчуття безладу;
- зменшення рівня повернень товарів, оскільки покупці можуть бути впевнені у своєму виборі завдяки попередньому віртуальному примірянню;

- ідеальне рішення для зайнятих людей, які не мають часу на відвідування фізичних магазинів, забезпечуючи можливість шопінгу в будь-який час;
- зменшення скупчення людей у магазинах під час карантинних заходів та надзвичайних ситуацій.

1.4 Постановка задачі

Мета роботи полягає в підвищенні продуктивності AR-додатків та покращенні якості віртуальної примірки шляхом оптимізації 3D моделей, що забезпечить користувачам зручний і ефективний досвід взаємодії. Робота передбачає виконання наступних етапів:

- огляд програмних інструментів: дослідження основних платформ для розробки AR-додатків та створення 3D моделей;
- дослідження типової технології розробки AR-додатків: аналіз етапів розробки AR-додатків, включаючи інтеграцію 3D контенту;
- оптимізація 3D моделей: визначення параметрів, що потребують оптимізації, та засоби їх покращення;
- розробка рекомендацій щодо технології розробки: пропозиція шляхів підвищення ефективності розробки AR-додатків через оптимізацію моделей;
- експериментальне дослідження: перевірка запропонованих рекомендацій.

2 ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Вибір програмного забезпечення для роботи з 3D моделями

Використовуючи метод лінійної згортки обрано програмне забезпечення для створення та роботи з 3D моделями для майбутнього AR-додатка «примірки» речей.

Серед альтернатив виділено:

- Blender (A1);
- Zbrush (A2);
- 3ds Max (A3);
- Cinema 4D (A4);
- Maya (A5);
- Modo (A6).

Для задачі виділено критерії, які здійснюють найбільший вплив на очікуваний результат. Такими критеріями є:

- ціна (K1), вага критерію = 0,1
- простота використання (K2): швидкість освоєння програми, вага критерію = 0,1;
- система текстур (K3): можливості роботи з текстурами для AR, вага критерію = 0,2;
- анімація (K4): можливості анімації об'єктів, вага критерію = 0,05
- вивід у AR (K5): зручність експорту моделей для AR, вага критерію = 0,1;
- сумісність з AR SDK (K6): підтримка форматів, що використовуються в AR, вага критерію = 0,1;
- спільнота та ресурси (K7): наявність навчальних матеріалів і форумів, вага критерію = 0,05;

- підтримка VR/AR (K8): можливості для роботи з VR та AR, вага критерію = 0,1;
- моделінг (K9): якість і можливості моделювання, вага критерію = 0,1;
- модульність (K10): можливість додавати нові функції через плагіни чи аддони, вага критерію = 0,1.

Графічне зображення дерева альтернатив відображено на рисунку 2.1.

Матриця попарних порівнянь критеріїв наведено у таблиці 2.1.

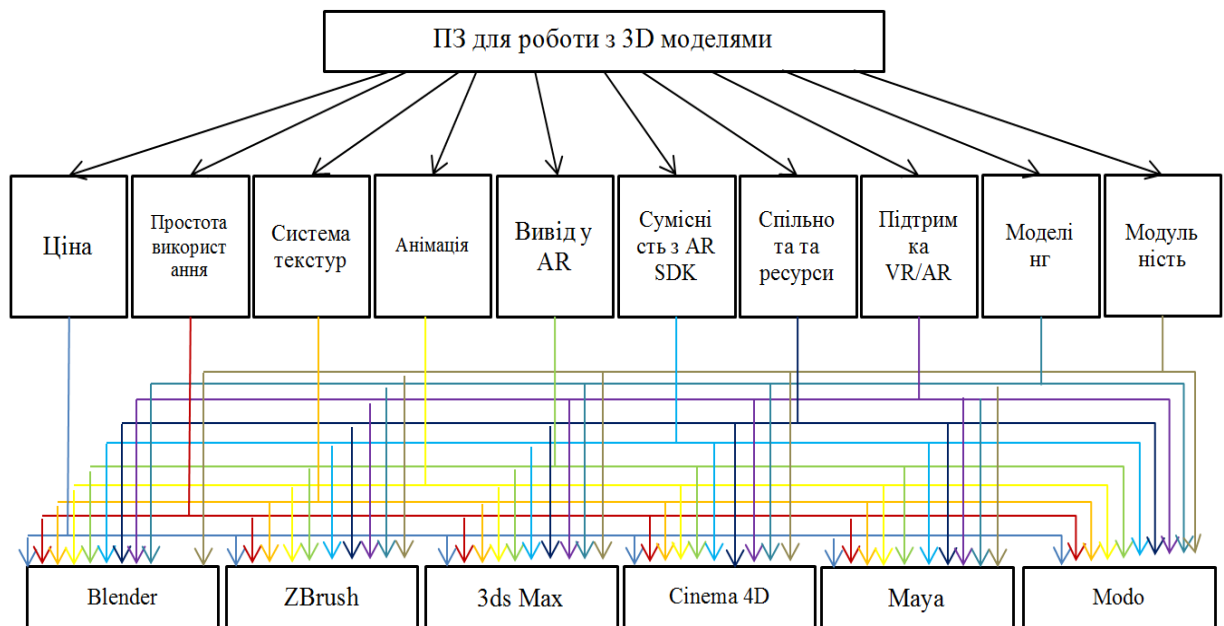


Рисунок 2.1 – Дерево альтернатив ПЗ для роботи з 3D моделями

Таблиця 2.1 – Матриця попарних порівнянь критеріїв для задачі вибору ПЗ для роботи з 3D моделями

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A1	Безкоштовно	Середня	Відмінна	Висока	Висока	Висока	Велика	Так	Високий	Висока
A2	Платно (підписка)	Висока	Відмінна	Обмежена	Обмежена	Обмежена	Велика	Ні	Високий	Обмежена
A3	Платно (ліцензія)	Середня	Відмінна	Висока	Досить хороша	Висока	Велика	Так	Високий	Обмежена
A4	Платно (ліцензія)	Висока	Досить хороша	Висока	Хороша	Висока	Велика	Так	Високий	Висока

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A5	Платно (ліцензія)	Серед- ня	Від- мінна	Висока	Висо- ка	Висо- ка	Вели- ка	Так	Висо- кий	Висо- ка
A6	Платно (ліцензія)	Серед- ня	Хоро- ша	Серед- ня	Добра	Серед- ня	Серед- ня	Так	Висо- кий	Серед- ня
w	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1

Далі проведено нормалізацію значень критеріїв, результат який наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Нормалізація значень критеріїв для задачі вибору ПЗ для роботи з 3D моделями

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
A1	1	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1
A2	0	1	1	0,25	0,5	0,25	1	0	1	0,25
A3	0	0,5	1	1	0,7	1	1	1	1	0,25
A4	0	1	0,7	1	0,75	1	1	1	1	1
A5	0	0,5	1	1	1	1	1	1	1	1
A6	0	0,5	0,75	0,5	0,6	0,5	0,5	1	1	0,5
w	0,1	0,1	0,2	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1

Вирішення багатокритеріальної задачі вибору методом лінійної згортки передбачає вибір альтернативи $a_i \in A$, так щоб максимізувати наступний вираз:

$$\sum_{j=1}^m w_j X_j(a_i),$$

де w_j – вагомий коефіцієнт важливості;

$X_j(a_i)$ – функція або механізм перетворення значення оцінки a_i альтернативи за j -м критерієм у межах вибраної числової шкали;

m – набір чисел, які відповідають критеріям оцінки альтернатив і визначають за кожним критерієм переваги особи, що приймає рішення.

Результати обчислень для вибору кращої альтернативи зведено у табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати обчислень для задачі вибору ПЗ для роботи з 3D моделями

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	Σ
A1	0,1	0,05	0,2	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,95
A2	0	0,1	0,2	0,0125	0,05	0,025	0,05	0	0,1	0,025	0,56
A3	0	0,05	0,2	0,05	0,07	0,1	0,05	0,1	0,1	0,025	0,75
A4	0	0,1	0,14	0,05	0,075	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,82
A5	0	0,05	0,2	0,05	0,1	0,1	0,05	0,1	0,1	0,1	0,85
A6	0	0,05	0,15	0,025	0,06	0,05	0,025	0,1	0,1	0,05	0,61

У результаті найкращим програмним забезпечення для роботи з 3D моделями стає Blender (альтернатива 1). Отже, Blender – це безкоштовний програмний пакет для створення тривимірної графіки, що має відкритий вихідний код. Ця платформа підтримує весь конвеєр процесів, пов'язаних із 3D-модельюванням, включаючи ригінг, анімацію, симуляцію, рендеринг, композитинг, відстеження руху, відеомонтаж та розробку ігор. Досвідчені користувачі мають можливість використовувати API програми для написання сценаріїв на Python, що дозволяє їм налаштовувати функціонал Blender та створювати спеціалізовані інструменти. Ці інструменти часто інтегруються в майбутні версії програми, що свідчить про активну участь спільноти у розвитку програмного забезпечення. Blender є особливо корисним для приватних осіб та невеликих студій, які отримують переваги від уніфікованого конвеєра та гнучкого процесу розробки, що сприяє творчій реалізації проєктів [16].

Blender є кросплатформеним рішенням, що однаково ефективно функціонує на комп'ютерах з операційними системами Linux, Windows і macOS. Інтерфейс програми базується на технології OpenGL, що забезпечує стабільну та швидку роботу.

Програму було розроблено в 1994 році Тоном Роосендаалом для внутрішнього використання в його анімаційній студії. З самого початку Blender орієнтувався на доступність та надання користувачам можливостей для творчого самовираження.



Рисунок 2.2 – Інтерфейс програми Blender

Хоча інтерфейс Blender базується на тривимірному вікні, його можна повністю налаштувати відповідно до потреб конкретного робочого процесу або розміщення на екрані. За замовчуванням основними областями, що представляють інтерес для моделювання, є:

- 3D-видошукач (3D viewport), який можна перетворити на 2D-видошукач (2D viewport) для відображення класичних проекцій, таких як фронтальна, бічна чи верхня;
- контур (Outliner), що містить перелік усіх елементів поточного файлу і розташований у верхньому правому куті інтерфейсу;
- панель властивостей, розміщена в нижньому правому куті, яка надає доступ до різних утиліт для моделювання, включаючи панель модифікаторів.

Ці елементи забезпечують користувачам зручність у роботі та підвищують ефективність процесів 3D-дизайну (рисунок 2.2).

Blender має багато можливостей та функцій, основними є:

- 3D-моделювання: інструменти для полігонального моделювання, скульптинг, модифікатори та використання кривих;
- анімація: підтримка скелетної анімації, анімації об'єктів, шейпових ключів та графіків;

- рендеринг: вбудовані рендерери Cycles і Eevee, які забезпечують фотореалістичний та рендеринг у реальному часі;
- текстурування та матеріали: редактор матеріалів, підтримка вузлів для складних текстур;
- симуляції: можливості для симуляцій рідин, диму, частинок та тканин;
- композиція та відеомонтаж: вбудовані інструменти для створення композицій та базового редагування відео;
- скриптування: підтримка Python для автоматизації процесів та створення аддонів;
- підтримка VR/AR: можливості для створення контенту для віртуальної та доповненої реальності [17].

2.2 Вибір рушія розробки додатка доповненої реальності

Використовуючи метод лінійної згортки обрано SDK доповненої реальності для реалізації AR-додатка «примірки» речей.

Серед альтернатив виділено:

- ARKit (A1);
- ARCore (A2);
- PTC Vuforia (A3);
- Wikitude (A4);
- Maxst (A5);
- DeepAR (A6);
- EasyAR (A7);
- Xzimg (A8).

Для задачі виділено критерії, які здійснюють найбільший вплив на очікуваний результат. Такими критеріями є:

- максимальна дальність захоплення, m (K1), вага критерію = 0,1;

- стійкість розпізнавання нерухомого маркера (K2), вага критерію = 0,1;
 - стійкість розпізнавання рухомого маркера (K3), вага критерію = 0,1;
 - розпізнавання мінімального кута (K4), вага критерію = 0,15;
 - мінімальна видимість для розпізнавання перекритого маркера, % (K5), вага критерію = 0,15;
 - 2D розпізнавання (K6), вага критерію = 0,05;
 - 3D розпізнавання (K7), вага критерію = 0,1;
 - геолокація (K8), вага критерію = 0,05;
 - хмарне розпізнавання (K9), вага критерію = 0,1;
 - SLAM (одночасна локалізація та відображення) (K10), вага критерію = 0,1.
- Графічне зображення дерева альтернатив відображено на рисунку 2.3.

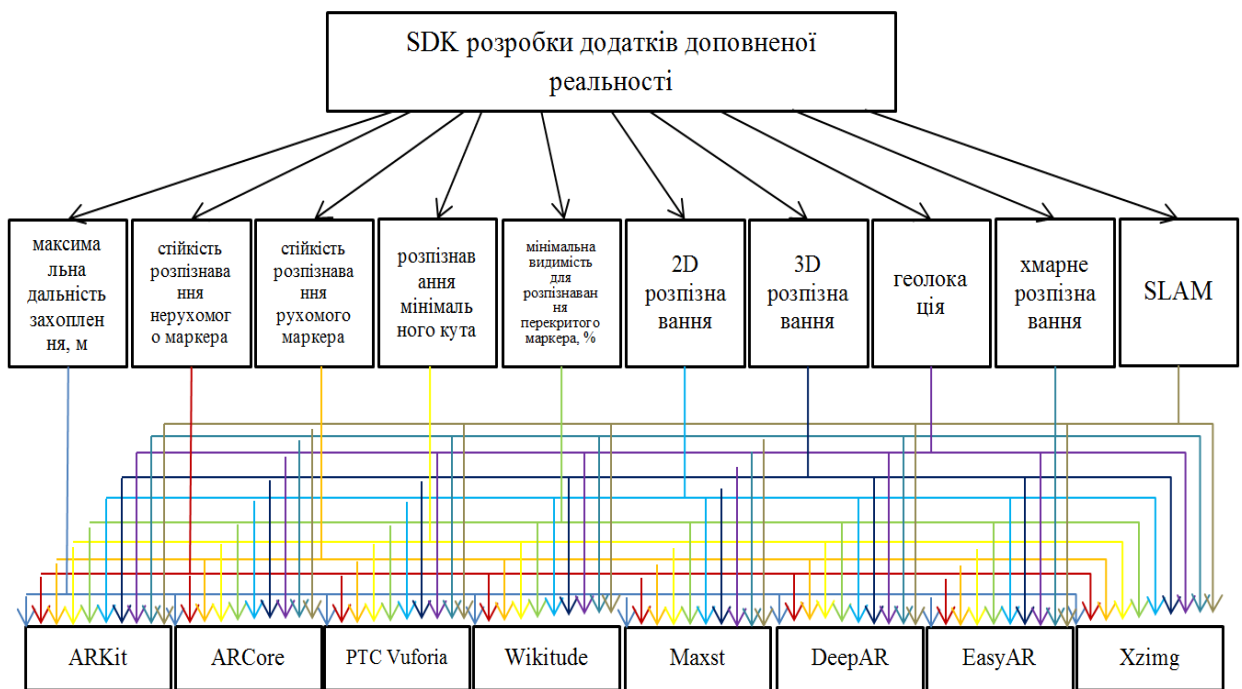


Рисунок 2.3 – Дерево альтернатив SDK доповненої реальності

Матриця попарних порівнянь критеріїв наведено у таблиці 2.4.

Далі проведено нормалізацію значень критеріїв, результат який наведено у таблиці 2.5.

Таблиця 2.4 – Матриця попарних порівнянь критеріїв для задачі вибору SDK доповненої реальності

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A1	5	9	7	30	80	+	+	+	+	+
A2	3	8	5	45	65	+	+	+	+	+
A3	3,7	10	6	30	20	+	+	-	+	+
A4	4,5	5	5	10	90	+	+	+	+	+
A5	0,9	7	2	50	50	+	+	-	-	+
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
A6	5	8	8	40	80	+	+	-	+	+
A7	2,7	7	3	35	10	+	-	-	-	-
A8	1	4	3	45	25	+	+	-	-	-
w	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1

Таблиця 2.5 – Нормалізація значень критеріїв для задачі вибору SDK доповненої реальності

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
A1	5	9	7	30	80	1	1	1	1	1
A2	3	8	5	45	65	1	1	1	1	1
A3	3,7	10	6	30	20	1	1	0	1	1
A4	4,5	5	5	10	90	1	1	1	1	1
A5	0,9	7	2	50	50	1	1	0	0	1
A6	5	8	8	40	80	1	1	0	1	1
A7	2,7	7	3	35	10	1	0	0	0	0
A8	1	4	3	45	25	1	1	0	0	0
w	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1

Вирішення багатокритеріальної задачі вибору методом лінійної згортки передбачає вибір альтернативи $a_i \in A$, так щоб максимізувати наступний вираз:

$$\sum_{j=1}^m w_j X_j(a_i),$$

де w_j – вагомий коефіцієнт важливості;

$X_j(a_i)$ – функція або механізм перетворення значення оцінки a_i альтернативи за j -м критерієм у межах вибраної числової шкали;

m – набір чисел, які відповідають критеріям оцінки альтернатив і визначають за кожним критерієм переваги особи, що приймає рішення.

Результати обчислень для вибору кращої альтернативи зведено у таблицю 2.6. У результаті найкращим рушієм для реалізації AR-додатка «примірки» речей стає DeerAR (альтернатива б).

Таблиця 2.6 – Результати обчислень для задачі вибору SDK доповненої реальності

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10	Σ
A1	0,5	0,9	0,7	4,5	12	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	19
A2	0,3	0,8	0,5	6,75	9,75	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	18,5
A3	0,37	1	0,6	4,5	3	0,05	0,1	0	0,1	0,1	9,82
A4	0,45	0,5	0,5	1,5	13,5	0,05	0,1	0,05	0,1	0,1	16,85
A5	0,09	0,7	0,2	7,5	7,5	0,05	0,1	0	0	0,1	16,24
A6	0,5	0,8	0,8	6	12	0,05	0,1	0	0,1	0,1	20,45
A7	0,27	0,7	0,3	5,25	1,5	0,05	0	0	0	0	8,07
A8	0,1	0,4	0,3	6,75	3,75	0,05	0,1	0	0	0	11,45

Отже, DeerAR SDK надає розробникам можливість інтегрувати функції доповненої реальності в свої додатки. Це програмне забезпечення виступає в ролі інструмента для роботи з ефектами DeerAR, пропонуючи широкий набір вбудованих API, необхідних для створення ефективних рішень у сфері AR. DeerAR SDK є основою, на якій ґрунтуються всі можливі сценарії використання та рішення, що пропонуються платформою.

Для досягнення вражаючих результатів DeerAR застосовує технології машинного навчання (ML) та глибокого навчання, що дозволяють точно відстежувати людські риси, такі як положення обличчя та вирази. Завдяки даним, отриманим під час ML-відстеження, DeerAR здатний накладати 2D- і 3D-графіку на зображення, яке знімається камерою, створюючи враження доповненої реальності. Процес аналізу обличчя та рендерингу графіки виконується у режимі реального часу, кадр за кадром. Додаток передає кадри з камери до системи DeerAR, де відбувається аналіз обличчя (або інших об'єктів, таких як зап'ястя чи ступні), після чого графіка рендериться і результати виводяться на екран (рисунок 2.4).

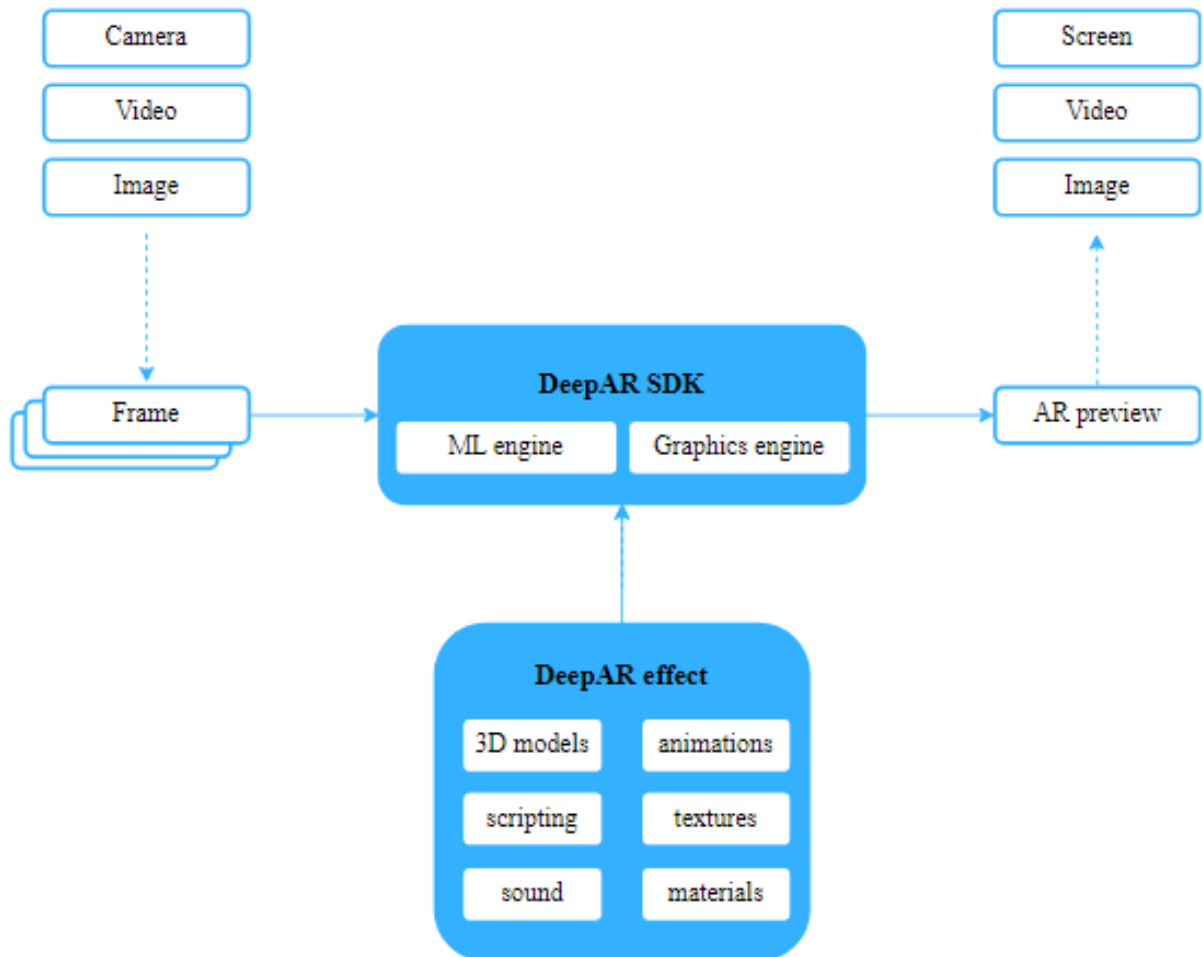


Рисунок 2.4 – Схема роботи DeepAR SDK

DeepAR SDK також включає ефекти DeepAR, що містять усі необхідні 3D-активи, анімації та логіку, які визначають, як буде виглядати доповнена реальність у додатку [14]. Крім того, DeepAR підтримує різноманітні платформи, такі як iOS, MacOS, Android та веб. У таблиці 2.7 представлено повний список можливостей, доступних для кожної з цих платформ, що дозволяє розробникам вибрати оптимальний варіант для своїх проєктів [15].

Таблиця 2.7 – Можливості DeepAR SDK

Функція	iOS	MacOS	Android	Веб
Відстеження обличчя	+	+	+	+
Відстеження стопи	+	+	+	+
Відстеження зап'ястя та руки	+	+	+	+
Заміна фону	+	+	+	+
Розмиття фону	+	+	+	+
Стандартне відстеження обличчя	+	+	+	+
Відстеження кількох облич	+	+	+	+

Продовження таблиці 2.7

Функція	iOS	MacOS	Android	Веб
Виявлення емоцій	+	+	+	-
Тригери емоцій	+	+	+	+
Залежний від часу шейдер	+	+	+	+
Відтворення звуку	+	+	+	+
Відеозапис	+	+	+	+
Відстеження положення очей	+	+	+	+
3D-фізика	+	+	+	+
Створення сценаріїв	+	+	+	+
Рендеринг текстур	+	+	+	+
Підтримка відео текстур	+	+	+	-
Сегментація волосся	+	-	-	-

3 РОЗРОБКА AR-ДОДАТКА

3.1 Розробка вимог до інтерфейсу клієнтської частини системи

При розробці вимог до інтерфейсу клієнтської частини AR-додатка «примірки» речей, побудовано UML-діаграму варіантів використання системи. Вона представлена на рисунку 3.1 та ілюструє основні сценарії взаємодії користувача з додатком.

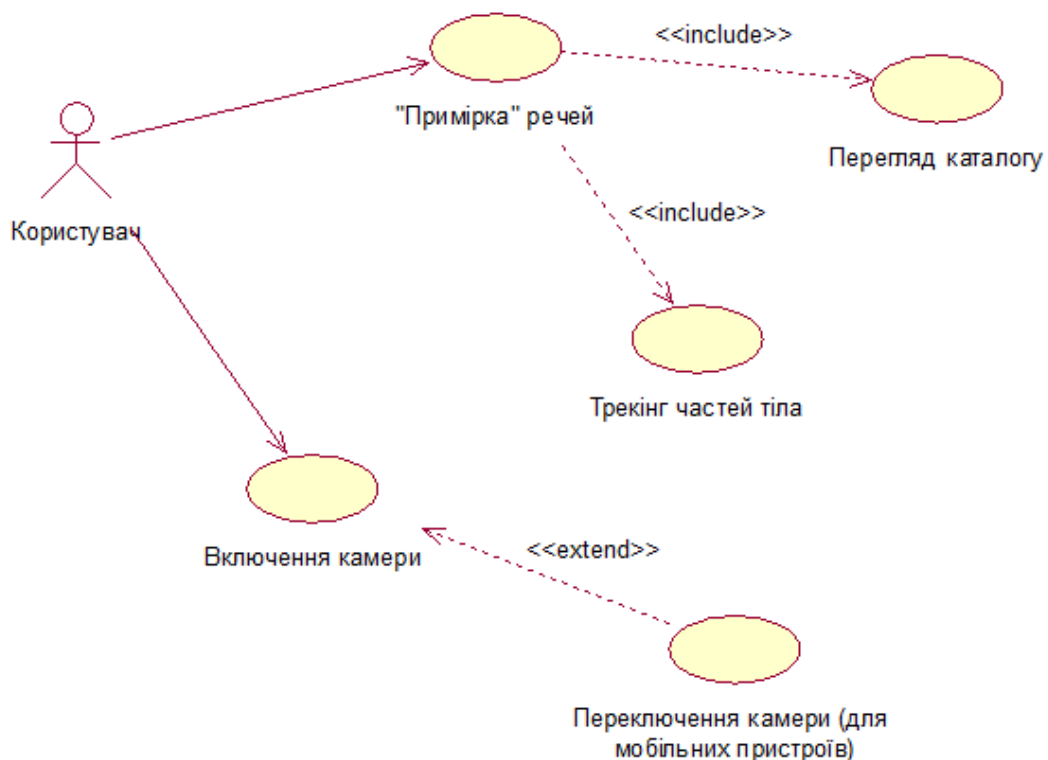


Рисунок 3.1 – Діаграма варіантів використання AR-додатка «примірки» речей

Ця діаграма є важливим інструментом у системному аналізі, оскільки вона допомагає візуалізувати відносини між акторами (в даному випадку, користувачем) і прецедентами (сценаріями використання). Діаграма служить для уточнення вимог до системи, демонструючи, як користувач може взаємодіяти з функціональністю додатка.

У цьому випадку, користувач має можливість здійснити «примірку» речей. Цей процес включає перегляд каталогу товарів та трекінг частин тіла

для додавання AR-ефектів, що дозволяє візуалізувати, як річ виглядатиме на користувачеві. До обов'язків користувача також входить активування камери для проведення «примірки». Веб-додаток постійно запитуватиме дозвіл на доступ до камери після кожного завантаження, що є важливим аспектом забезпечення приватності користувача. Крім того, якщо додаток використовується на мобільному пристрої, користувач може переключатися між основною та фронтальною камерами, що забезпечує зручність у використанні та покращує досвід взаємодії.

3.2 Типова розробка додатків доповненої реальності

Повна схема роботи доповненої реальності зображено на рисунку 3.2, складається з кількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у взаємодії реального та віртуального світів.

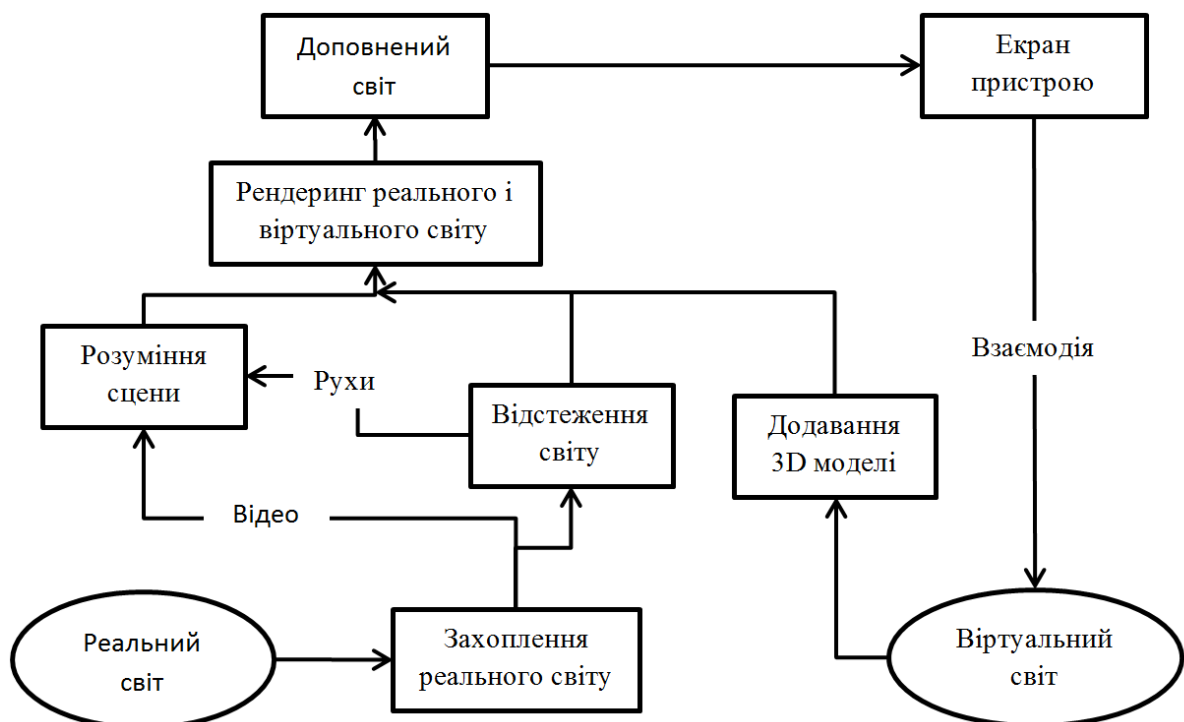


Рисунок 3.2 – Повна схема роботи доповненої реальності

Захоплення реального світу є першим етапом у роботі системи доповненої реальності, де камера або інші сенсори пристрою фіксують реальний світ. Відеопотік або зображення, отримані з камери, надходять до системи для подальшої обробки. Мета цього етапу – створити реальне середовище, яке згодом буде поєднуватися з віртуальними елементами.

Віртуальний світ містить усі об'єкти, які можуть бути додані до сцени доповненої реальності, такі як 3D-моделі, графічні елементи або текст. Ці об'єкти взаємодіють із реальним світом через систему AR. У цьому компоненті створюються та зберігаються всі віртуальні елементи, які будуть використовуватися у додатку.

Відстеження реального світу – це процес визначення положення, орієнтації та рухів пристрою або об'єктів у просторі. Це дозволяє точно прив'язувати віртуальні об'єкти до відповідних точок у реальному світі. У доповненій реальності існує багато методів трекінгу, які можна розділити на два основних підходи: трекінг з мітками (marker-based) та трекінг без міток (markerless).

Трекінг з мітками (Marker-Based Tracking) використовує специфічні візуальні мітки, які можуть бути розпізнані пристроєм:

- фідучіарні маркери (fiducial markers): це чорні та білі квадрати або спеціальні QR-коди, які використовуються для точного позиціонування віртуальних об'єктів. Пристрій розпізнає мітку, визначає її положення і накладає віртуальний контент на реальний світ;

- оптичний трекінг: використання візуальних особливостей об'єктів або середовища, таких як контури, текстури та інші графічні елементи для визначення положення об'єктів.

Трекінг без міток (Markerless Tracking) не вимагає використання фізичних міток, а спирається на інші методи для трекінгу:

- трекінг на основі геолокації (GPS-based tracking): використовує дані GPS для визначення місця розташування користувача. Це часто

використовується в AR-додатках, які показують віртуальні об'єкти в реальному світі на основі їх географічного положення;

– трекінг на основі візуальних особливостей (feature-based tracking): використовує алгоритми комп'ютерного зору для розпізнавання особливостей середовища, таких як границі, текстури та інші візуальні елементи, щоб визначити положення об'єктів;

– інерційний трекінг (inertial tracking): використовує дані з акселерометрів і гіроскопів для визначення руху та орієнтації пристрою в реальному часі.

Кожен з підходів має свої переваги та недоліки, і вибір між ними залежить від конкретних вимог застосування. Трекінг з мітками може забезпечити високу точність, тоді як трекінг без міток може бути більш гнучким і не вимагає фізичних міток [31].

Блок додавання 3D моделі відповідає за інтеграцію 3D-моделей у віртуальний світ. Він дозволяє користувачу або системі додавати об'єкти для подальшого їх використання та рендерингу. Після додавання моделей, вони стають частиною віртуального світу і можуть бути прив'язані до конкретних позицій у реальному просторі завдяки технологіям відстеження.

Етап рендерингу реального і віртуального світу є ключовим у поєднанні реального і віртуального світів. Рендеринг здійснює обробку візуальних даних із реального світу (зображень або відео) та накладання на них 3D-моделей або інших елементів віртуальної реальності. Завдання рендерингу – створити зображення, яке користувач бачить на екрані, об'єднуючи обидва світи в єдину сцену.

Етап аналізу сцени пов'язаний із розумінням просторової конфігурації реального світу. Система аналізує, які об'єкти або площини є у реальному середовищі (наприклад, підлога, стіни), щоб коректно розміщувати на них або навколо них віртуальні елементи. Розпізнавання сцен дозволяє поліпшити взаємодію між віртуальними та реальними об'єктами, роблячи сцену більш реалістичною і гармонійною.

Взаємодія з віртуальним світом забезпечує можливість користувачу взаємодіяти з віртуальними об'єктами, доданими до сцени. Взаємодія може бути у вигляді маніпуляцій з 3D-моделями (переміщення, обертання) або виконання дій через жести чи інші засоби. Завдяки цій взаємодії користувач може впливати на поведінку віртуальних об'єктів, що підвищує інтерес і функціональність AR-додатків.

У кінці доповнений світ (поєднання реальних і віртуальних об'єктів) виводиться на екран пристрою. Користувач через дисплей може бачити віртуальні елементи, накладені на реальне середовище, і взаємодіяти з ними [7].

3.3 Архітектура розроблюваного AR-додатка

Архітектура веб-додатка доповненої реальності, представлена на рисунку 3.3, побудована з використанням різних модулів для інтеграції віртуальних компонентів у реальне середовище. Цей підхід дозволяє взаємодіяти з доданими цифровими елементами в реальному часі, створюючи нові можливості для користувачів.

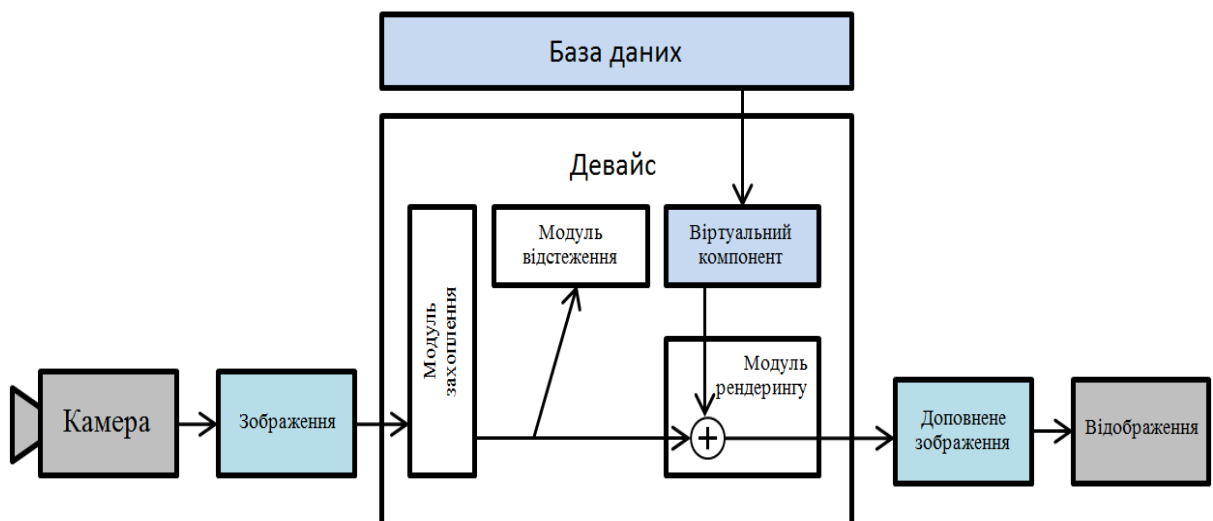


Рисунок 3.3 – Архітектура розроблюваного AR-додатка

Архітектура складається з наступних компонентів:

а) камера: вона є початковим джерелом даних для системи, захоплюючи реальне зображення фізичного середовища. Камера знімає навколишнє середовище, передаючи зображення або відеопотік у реальному часі на вхід системи. Камера може бути частиною смартфона, планшета або іншого пристрою з вбудованою камерою;

б) зображення: захоплене камерою зображення є вхідними даними для всіх подальших етапів обробки в системі доповненої реальності. Зображення, яке отримане від камери містить всю інформацію про реальне середовище й використовується для обробки на наступних етапах системи. Це зображення передається через модуль захоплення, щоб бути проаналізованим і обробленим;

в) модуль захоплення: обробляє зображення або відеопотік, який отримано від камери, і передає його на наступні етапи обробки;

г) модуль відстеження: визначає положення й орієнтацію реальних об'єктів у просторі. Після отримання зображення через модуль захоплення, модуль відстеження аналізує його для виявлення ключових об'єктів або маркерів у реальному світі. Він визначає їх положення, рух або інші характеристики, необхідні для правильного відображення віртуальних елементів у просторі;

д) база даних: зберігає віртуальні об'єкти та інші компоненти, що використовуються для доповнення зображення реального світу. Віртуальні компоненти зберігаються в базі даних і можуть бути витягнуті для накладання на зображення;

е) віртуальний компонент: є елементом, що буде додано до зображення для створення ефекту доповненої реальності. Система витягує відповідні віртуальні компоненти з бази даних і інтегрує їх у зображення. Ці компоненти можуть бути адаптовані до реального середовища, з огляду на їх місцезнаходження, розмір і орієнтацію;

ж) модуль рендерингу: відповідає за об'єднання реальних зображень з віртуальними компонентами. Модуль рендерингу поєднує зображення з реального світу з віртуальними об'єктами, забезпечуючи правильне позиціонування та відображення віртуальних елементів на основі даних від модуля відстеження. Це включає обчислення положення, перспективи та освітлення для правильного візуального сприйняття;

з) доповнене зображення: результат об'єднання реального й віртуального зображень. Після обробки і рендерингу виходить доповнене зображення, яке містить як реальні, так і віртуальні елементи. Це зображення є фінальним результатом, який буде відображений для користувача;

и) відображення: відображає доповнене зображення користувачеві. На завершальному етапі доповнене зображення виводиться на екран пристрою користувача. Це може бути смартфон, планшет або інший пристрій, що підтримує технології доповненої реальності. Користувач бачить поєднання реальних і віртуальних елементів у режимі реального часу.

Загальний процес роботи архітектури складається з наступних етапів:

- камера захоплює зображення реального світу;
- це зображення передається в систему через модуль захоплення, який забезпечує його правильну обробку та передачу на наступні етапи;
- модуль відстеження аналізує отримане зображення для визначення положення об'єктів у просторі;
- віртуальні компоненти витягуються з бази даних і підготовлюються для накладання на реальне зображення;
- модуль рендерингу поєднує реальні й віртуальні компоненти, забезпечуючи коректне відображення віртуальних елементів;
- після рендерингу утворюється доповнене зображення, яке потім передається на пристрій користувача для відображення.

Така архітектура дозволяє в режимі реального часу накладати віртуальні елементи на зображення реального світу, забезпечуючи користувачеві інтерактивний досвід доповненої реальності.

3.4 Реалізація застосунка «примірки» речей

Використовуючи можливості DeerpAR SDK, розроблено застосунок доповненої реальності «примірки» речей.

3.4.1 Розробка DeerpAR ефектів

Розробка ефектів за допомогою DeerpAR є захоплюючим процесом, що дозволяє створювати різноманітні AR-фільтри та візуальні ефекти для мобільних додатків. У центрі цього процесу знаходиться DeerpAR Studio – інструмент, який забезпечує можливість створення та налаштування всіх видів ефектів, доступних у DeerpAR.

На початку розробки обирається тип ефекту: у DeerpAR Studio можна створювати ефекти для різних об'єктів, таких як взуття, сумки, ювелірні вироби, окуляри та головні убори. Кожен з цих ефектів має свої специфічні вимоги до трекінгу [19].

Інтерфейс інструмента DeerpAR Studio наведено на рисунку 3.4.

Для ефектів, що стосуються взуття, використовується відстеження стопи. Це дозволяє точно позиціювати взуття на ногах користувача та створювати реалістичні візуалізації.

Для сумок та ювелірних виробів застосовується трекінг зап'ястя, що забезпечує коректне відображення аксесуарів у залежності від рухів рук.

Для окулярів, деяких ювелірних виробів та головних уборів ці ефекти вимагають трекінгу голови та обличчя. Це дозволяє ефективно позиціонувати об'єкти на голові користувача, враховуючи його рухи та вирази обличчя.

Після створення ефекту важливо провести тестування на різних пристроях, щоб переконатися в його коректності та адаптивності. DeerpAR Studio пропонує інструменти для швидкого попереднього перегляду та налаштування.

Розроблений ефект зберігається у форматі DEEPAR для подальшого використання у розроблюваному додатку.

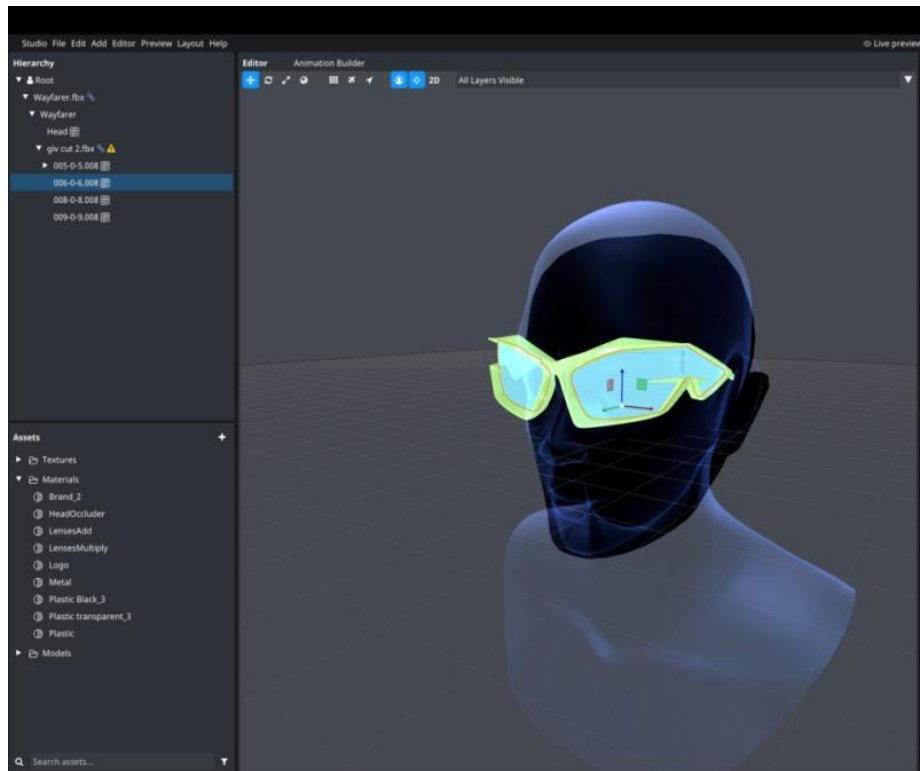


Рисунок 3.4 – Інтерфейс інструмента DeerpAR Studio

DeerpAR Studio забезпечує простий і інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, що дозволяє навіть початківцям без особливих технічних знань створювати ефекти. Інтеграція різноманітних елементів та налаштування трекінгу роблять процес творчим та гнучким.

У результаті розроблено каталог з 37 речей бренду Givenchy, з повним переліком можна ознайомитися у додатку А.

3.4.2 Підключення DeerpAR до розроблюваного додатка

DeerpAR пропонує зручний набір інструментів для створення AR-контенту, який легко інтегрується в мобільні та веб-додатки. Процес розробки AR-додатка простий: спочатку потрібно встановити DeerpAR SDK, створити новий проєкт у середовищі розробки та налаштувати SDK для

цільової платформи (iOS, Android, Web). Далі ініціалізується DeepAR у кодї, налаштовується відеопотік та додаються AR-ефекти, які прив'язуються до дій користувача [18].

Для тестування додатка на реальних пристроях використовується Ngrok, що дозволяє створити тунель для локального сервера. Для цього необхідно встановити Node.js, налаштувати проєкт, запустити локальний сервер і підключити Ngrok для зовнішнього доступу. Отримавши URL-адресу, можна тестувати додаток на різних пристроях, оцінюючи його продуктивність [30].

У результаті розроблено веб-додаток доповненої реальності «примірки» речей бренду Givenchy – GivAR, написаний мовами JavaScript та TypeScript на основі DeepAR SDK. Він має простий та зручний інтерфейс і швидкий доступ до меню. Додаток підтримує браузері Google Chrome, Safari, Mozilla Firefox та Microsoft Edge. Приклад роботи застосунка на різних пристроях, а саме завантаження меню та «примірка» речей, наведено на рисунках 3.6 та 3.7.

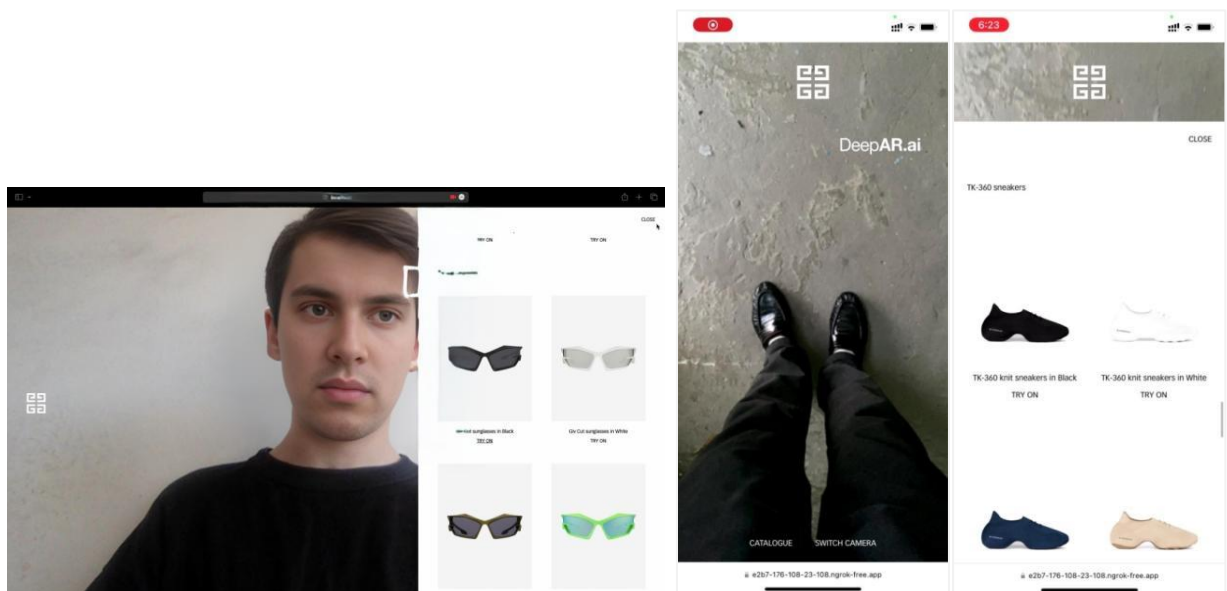


Рисунок 3.5 – Початковий екран та перегляд меню AR-дodatка GivAR

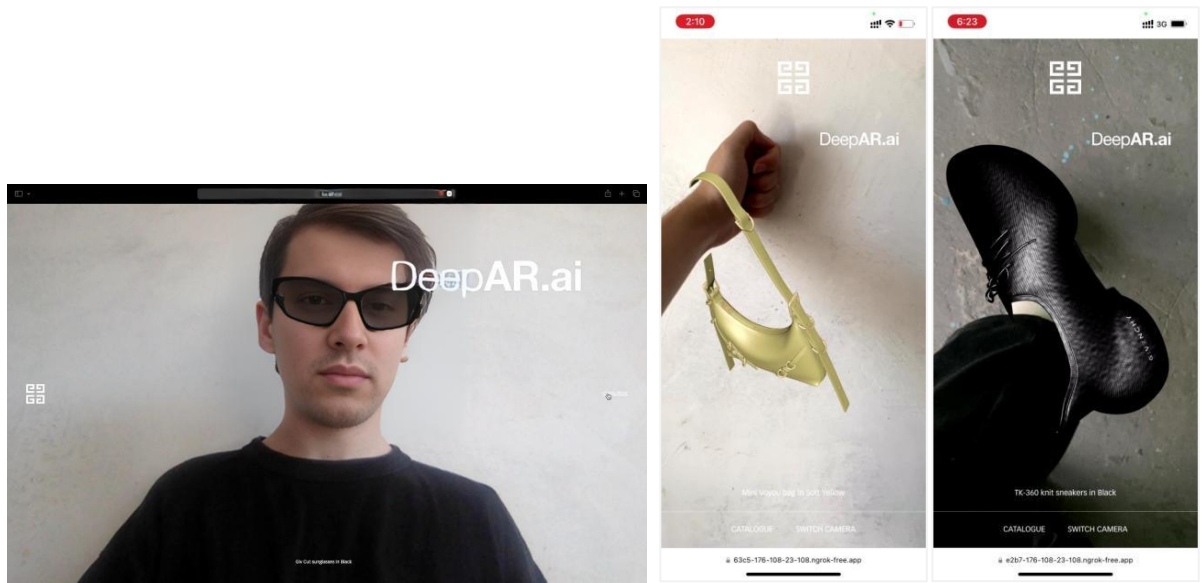


Рисунок 3.6 – «Примірка» речей в AR-додатку GivAR

4 ВИБІР МЕТОДІВ ТА ВИКОНАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ 3D МОДЕЛЕЙ

4.1 Вплив та важливість оптимізації 3D моделей в AR-додатках

Завдання оптимізації 3D моделей грає важливу роль для продуктивності додатків доповненої реальності (AR) та забезпечення захоплюючого і безперебійного користувацького досвіду. Погано оптимізовані моделі можуть призвести до цілої низки проблем, таких як зниження частоти кадрів, збільшення часу завантаження та загальне погіршення якості роботи з доповненою реальністю. Ці проблеми з продуктивністю не лише розчаровують користувачів, але й можуть вплинути на успіх додатку та його сприйняття на ринку.

Щоб вирішити ці проблеми, вкрай важливо впровадити ефективні методи оптимізації, які забезпечують баланс між продуктивністю та візуальною точністю. Зменшуючи складність 3D моделей, наприклад, мінімізуючи кількість полігонів та оптимізуючи текстури, розробники можуть значно підвищити продуктивність додатків.

Крім того, важливо враховувати вплив оптимізації 3D моделей на інші аспекти розробки AR-додатків, такі як використання пам'яті та час завантаження. Ефективно оптимізовані моделі допомагають зменшити навантаження на пам'ять додатку, що сприяє швидшому завантаженню та ефективнішому управлінню ресурсами. Це не тільки приносить користь користувачам, забезпечуючи більш безперебійну роботу, але й дозволяє розробникам розподіляти ресурси на інші аспекти дизайну додатків, такі як покращення інтерактивних функцій та елементів користувацького інтерфейсу.

Таким чином, оптимізація 3D моделей є фундаментальним аспектом розробки AR-додатків, який безпосередньо впливає на продуктивність і задоволеність користувачів. Застосовуючи найкращі практики та використовуючи доступні інструменти, розробники можуть досягти

гармонійного балансу між продуктивністю та візуальною якістю, що призведе до більш відшліфованої та приємної роботи з доповненою реальністю [20].

Основними методами оптимізації 3D моделей є

- оптимізація рівня деталізації (LOD);
- зменшення кількості полігонів;
- оптимізація текстур і матеріалів;
- оптимізація анімації;
- оптимізація ригінгу та скіннінгу.

4.2 Оптимізація 3D моделей методом зменшення кількості полігонів

Полігони в комп'ютерній графіці – це елементи, які використовуються для побудови поверхонь тривимірних об'єктів. Зазвичай полігони складаються з ряду з'єднаних вершин, які є точками в тривимірному просторі, що визначають форму багатокутника. Чим більше полігонів використовується в 3D моделі, тим вищий рівень деталізації має модель. Ці типи 3D моделей можна назвати високополігональними 3D моделями.

Високополігональні 3D моделі мають дуже високу якість візуальних елементів і виглядають реалістично. Основним недоліком використання високополігональних 3D моделей для доповненої реальності є те, що вони потребують багато ресурсів для перегляду. Більшість мобільних пристроїв не можуть впоратися з рендерингом 3D моделей з таким високим рівнем деталізації в реальному часі. Як наслідок, 3D модель може мати проблеми із завантаженням і викликати неприємні враження у глядача (рисунок 4.1).

Вирішенням цієї проблеми може стати зменшення кількості полігонів. Менша кількість полігонів зменшує ресурси, необхідні на пристрої для перегляду 3D моделі, оскільки зменшується кількість деталей для рендерингу. Зменшення кількості полігонів також зменшить розмір файлу 3D

моделі та час завантаження. 3D моделі з меншою кількістю полігонів можна назвати низькополігональними 3D моделями [14].

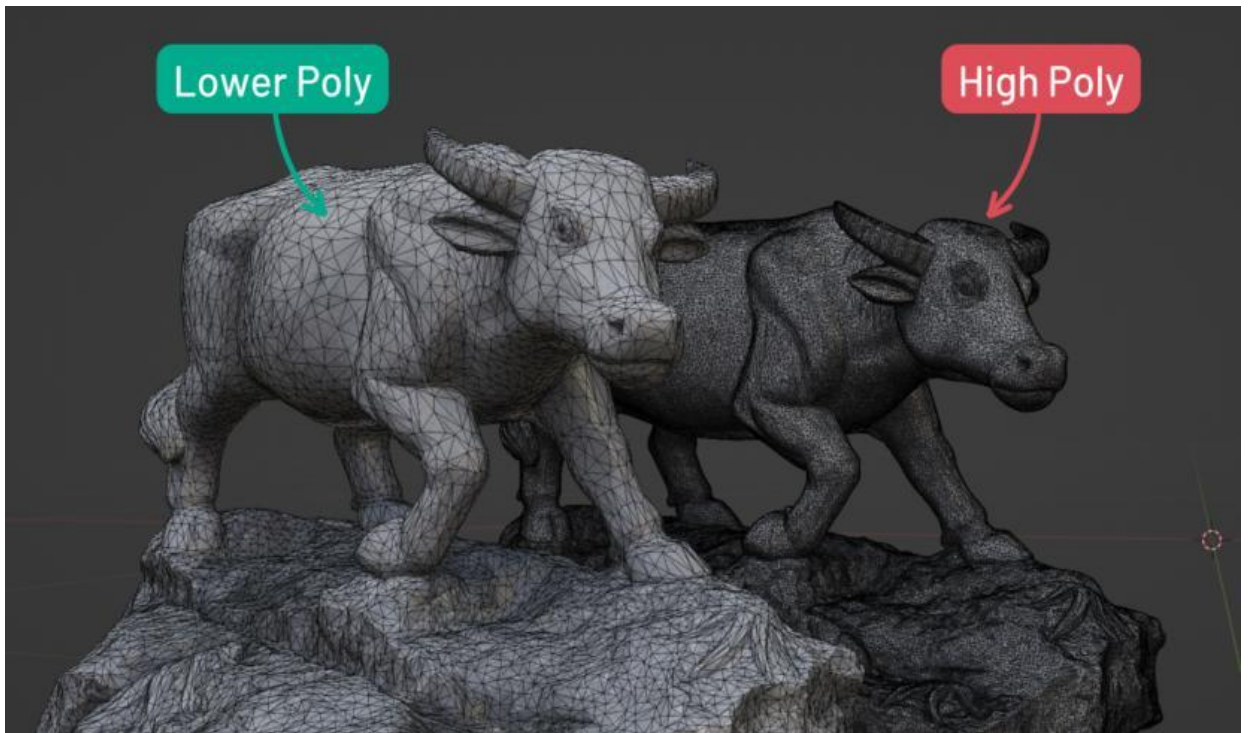


Рисунок 4.1 – Різниця між низькополігональними та високополігональними 3D моделями

Зменшення кількості полігонів допоможе вирішити проблеми з продуктивністю, але вплине на візуальну якість 3D моделі. У низькополігональній 3D моделі може бракувати деталей і вражаючих візуальних ефектів, які були у високополігональній 3D моделі. Автоматична оптимізація на складних і деталізованих 3D моделях також може пошкодити модель та/або її анімацію.

Зменшити кількість полігонів можливо у програмі Blender за допомогою модифікатора «Decimate». Для прикладу завантажено 3D модель сумки у форматі FBX (рисунок 4.2). Розмір файлу становить 22,3 МБ.

Перш ніж розпочати процес зменшення полігонів, важливо зрозуміти структуру 3D моделі. Щоб отримати таку статистику, потрібно:

а) відобразити каркас: перейти до меню «Накладення» («Overlays») і увімкнути опцію «Каркас» («Wireframe»);

б) переглянути статистику: аналогічно, обрати прапорець «Статистика» («Statistics»), щоб показати важливу інформацію, таку як кількість вершин, ребер та граней.



Рисунок 4.2 – Оригінальна 3D модель сумки, імпортована у програму Blender

Ознайомившись з цією статистикою, можна зосередитися на оптимізації конкретних компонентів 3D моделі (рисунок 4.3).

Щоб розпочати процес зменшення полігонів, потрібно виконати такі кроки:

а) обрати цільову геометрію: визначити компонент моделі, який потрібно оптимізувати, наприклад, корпус сумки;

б) відкрити модифікатор «Спрощення» («Decimate»): потрібно перейти на вкладку «Властивості модифікатора» («Modifier Properties») і обрати модифікатор «Спрощення» («Decimate») зі списку доступних опцій.

в) обрати параметр зменшення: модифікатор зменшення надає різні стратегії для зменшення кількості полігонів, зокрема:

1) «Стягнення» («Collapse») – поступово об'єднує вершини разом, враховуючи форму сітки. Для цієї демонстрації обрано саме цю опцію;

2) «Без поділу» («Un-Subdivide») – її можна розглядати як протилежну до операції поділу (subdivide). Вона намагається видалити ребра, які були отримані в результаті операції subdivide. Призначена для сіток з переважно сітковою топологією (без нерівномірної геометрії). Якщо після операції поділу було виконано додаткове редагування, результати можуть бути неочікуваними;

3) «Площинно» («Planar») – зменшує кількість деталей на формах, що складаються переважно з плоских поверхонь [24];

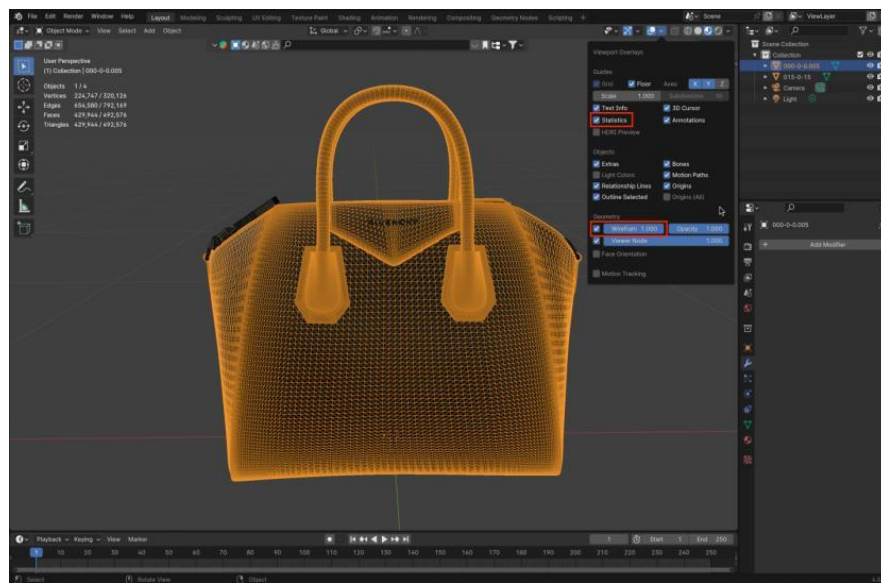


Рисунок 4.3 – Перегляд статистики структури 3D моделі

г) налаштування коефіцієнту коригування: зменшуючи значення коефіцієнта, можна ефективно зменшити кількість граней. У цьому прикладі встановлення коефіцієнта на 0,1 призвело до значного зменшення граней з 429 944 до 42 993 (рисунок 4.4);

д) перегляд у реальному часі: для цього потрібно увімкнути опцію «Перегляд у реальному часі» («Realtime»), щоб миттєво візуалізувати зміни, порівнюючи модель до і після зменшення кількості полігонів;

е) застосування модифікатора: щоб завершити процес оптимізації, потрібно натиснути кнопку «Застосувати» («Apply») в налаштуваннях модифікатора «Спрощення» (рисунок 4.5) [23].

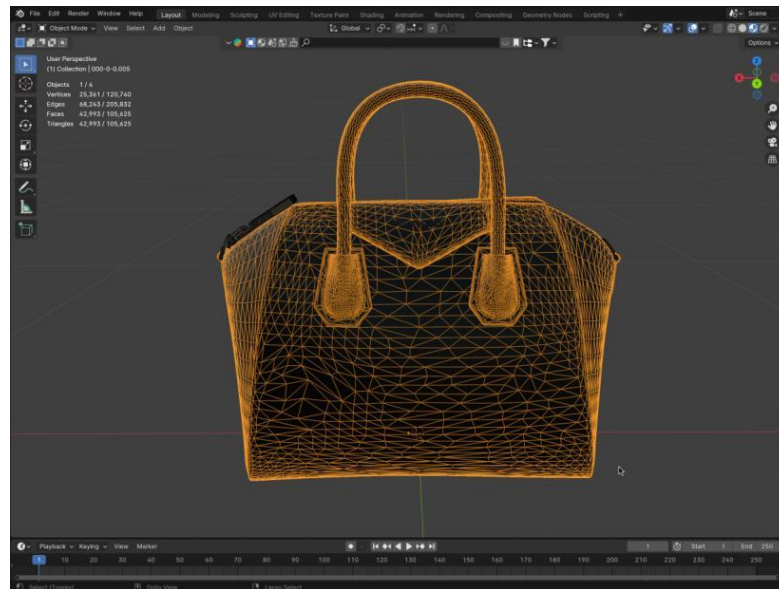


Рисунок 4.4 – Результат зменшення полігонів за допомогою модифікатора «Спрощення» («Decimate»)

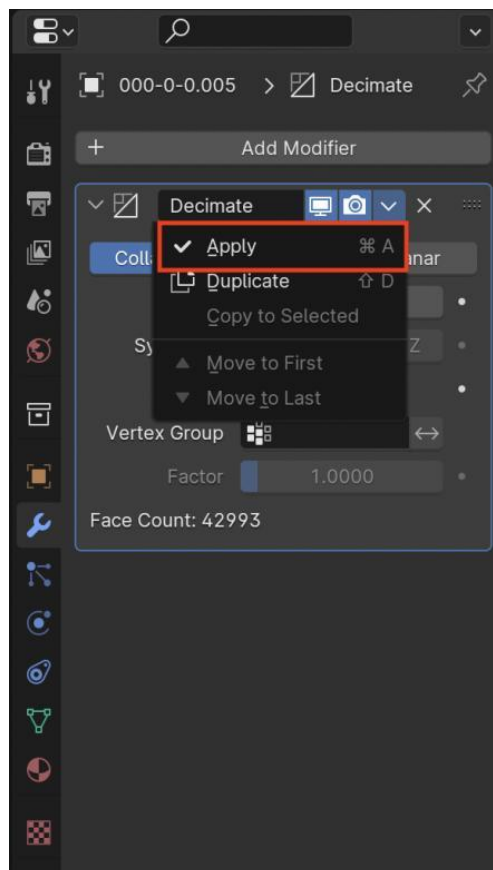


Рисунок 4.5 – Застосування налаштувань модифікатора «Спрощення»

У результаті такої оптимізації, розмір файлу 3D моделі сумки зменшився до 7,5 МБ. Це свідчить про те, що оптимізація кількості полігонів є важливим

кроком у підвищенні продуктивності 3D моделей. Використовуючи модифікатор Decimate у Blender, можна ефективно оптимізувати складну геометрію, зберігаючи при цьому візуальну цілісність (рисунок 4.6).

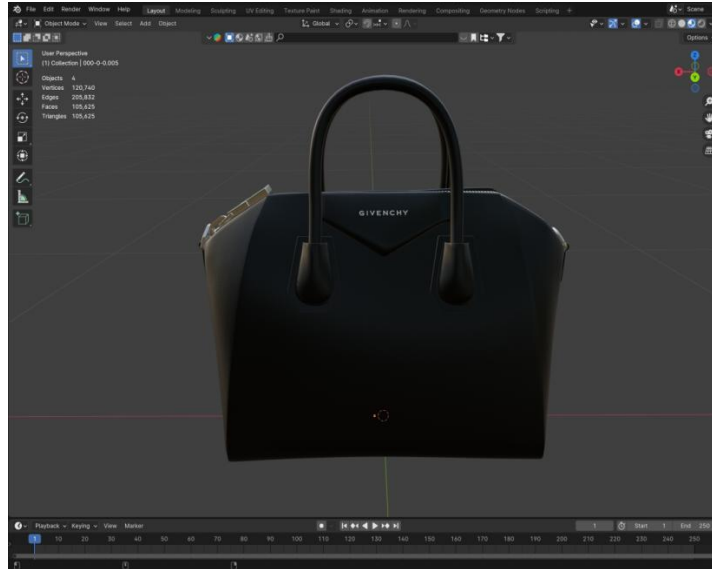


Рисунок 4.6 – Кінцевий результат оптимізації 3D моделі шляхом зменшення кількості полігонів

4.3 Оптимізація 3D моделей методом оптимізації текстур і матеріалів

Текстура – це растрове зображення, яке проєктується на 3D модель, щоб надати їй більше деталей і характеристик. Високоякісні текстури покращують деталізацію 3D моделі та роблять об'єкт більш реалістичним. Щоб досягти цього ефекту, кожна 3D модель може мати більше одного файлу текстури. Але недолік полягає в тому, що кілька текстурних файлів можуть займати більше місця і робити 3D модель важчою, а в результаті - знижувати продуктивність. Тому іноді, на додаток до основної кольорової текстури, 3D моделі можуть потребувати оптимізації додаткових текстур, таких як карти нормалей, дзеркальні карти, карти переміщень, карти оклюзії навколишнього середовища та інші, для кращої якості та більш реалістичних ефектів (рисунок 4.7).

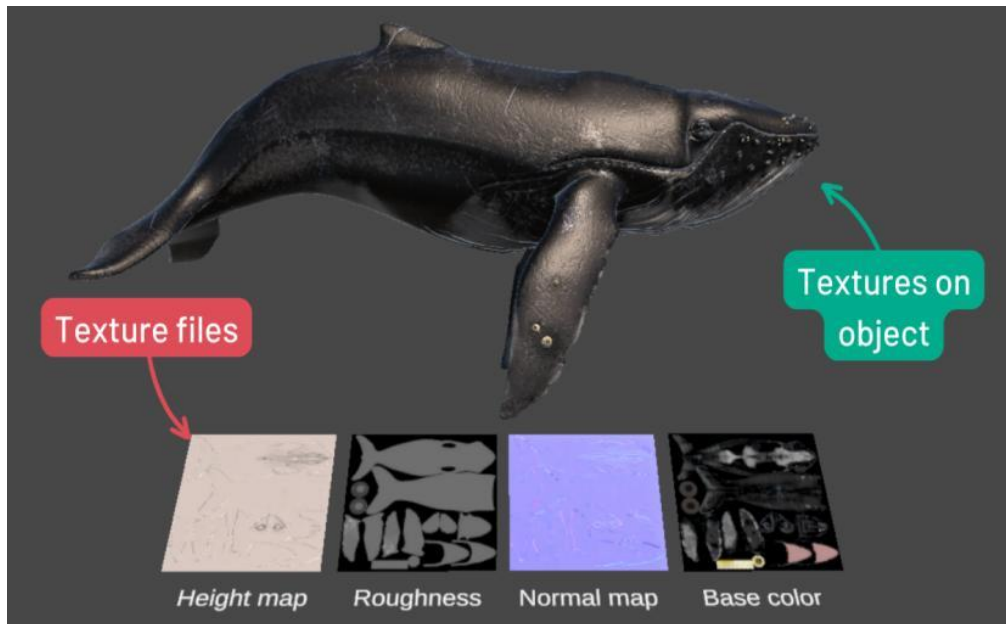


Рисунок 4.7 – Файли текстур 3D моделей: карта висот, шорсткість, карта нормалей, основна кольорова текстура

Оптимізація текстур – це процес зменшення розмірів текстур, що використовуються в 3D моделі. В результаті можна отримати менший розмір файлу, що може покращити продуктивність 3D моделі. Недоліки оптимізації текстур полягають у тому, що при цьому знижується роздільна здатність зображення текстури, що може призвести до втрати якості візуалізації 3D моделі [22].

Цей метод передбачає стиснення текстури, використовуючи формати JPEG або PNG з низьким ступенем стиснення, щоб зменшити розмір файлу, зберігаючи деталізацію текстури. Крім того, атласи текстур або методи пакування можуть об'єднувати кілька текстур в одне зображення, мінімізуючи виклики до відображення та покращуючи швидкість рендерингу [21].

У Blender оптимізацію 3D моделей методом оптимізації текстур і матеріалів можна провести за допомогою запікання (рис. 4.8).

Текстурне запікання – це процес взяття всіх матеріалів на одному або декількох об'єктах і зведення їх у карти зображень. Це означає, що базові матеріали, процедурні матеріали та інше зводиться до єдиного зображення.

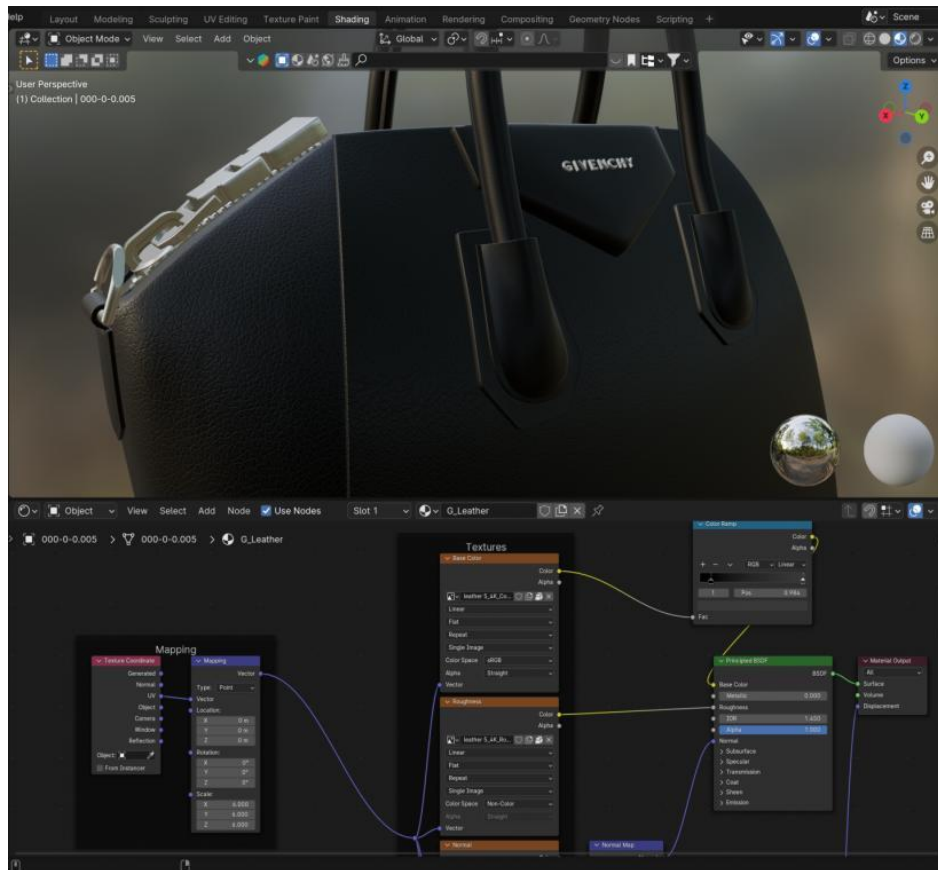


Рисунок 4.8 – Оригінальний матеріал шкіри корпусу сумки

Запікання текстури використовується для об'єднання кількох матеріалів з одного об'єкта в один матеріал. Також можна об'єднати матеріали з декількох об'єктів в один матеріал, який буде використовуватися на всіх об'єктах.

Об'єкт із запеченими матеріалами набагато ефективніший і може бути легко експортований в іншу програму для роботи з 3D моделями [26].

Запікання текстури у Blender складається з наступних кроків:

а) UV-розгорткування: у режимі редагування потрібно обрати всю сітку об'єкта, перейти на вкладку «UV Редагування» (UV Editing) і в меню обрати «UV» / «Розгорткування» (Unwrap) / «Smart UV Project» (рисунок 4.9). Також треба зазначити, що після цієї процедури автоматично створюється нова UV-карта з ім'ям UVTex;

б) створення нового зображення для запікання: виділивши об'єкт, який потрібно запекти, потрібно перейти до редактора шейдерів (вкладка

«Shading») і обрати будь-який матеріал, застосований до об'єкта. У редакторі обрати вузол текстури зображення («Image Texture»). Далі, після натискання на кнопку «Нове зображення» («New Image»), з'явиться вікно, в якому потрібно буде додати інформацію про нове зображення, до якого буде застосовано зачіпку. Двома важливими параметрами будуть назва і розмір зображення. В цьому прикладі Вакє є ім'ям, а розмір зображення – 512x512 пікселів (рисунок 4.10).

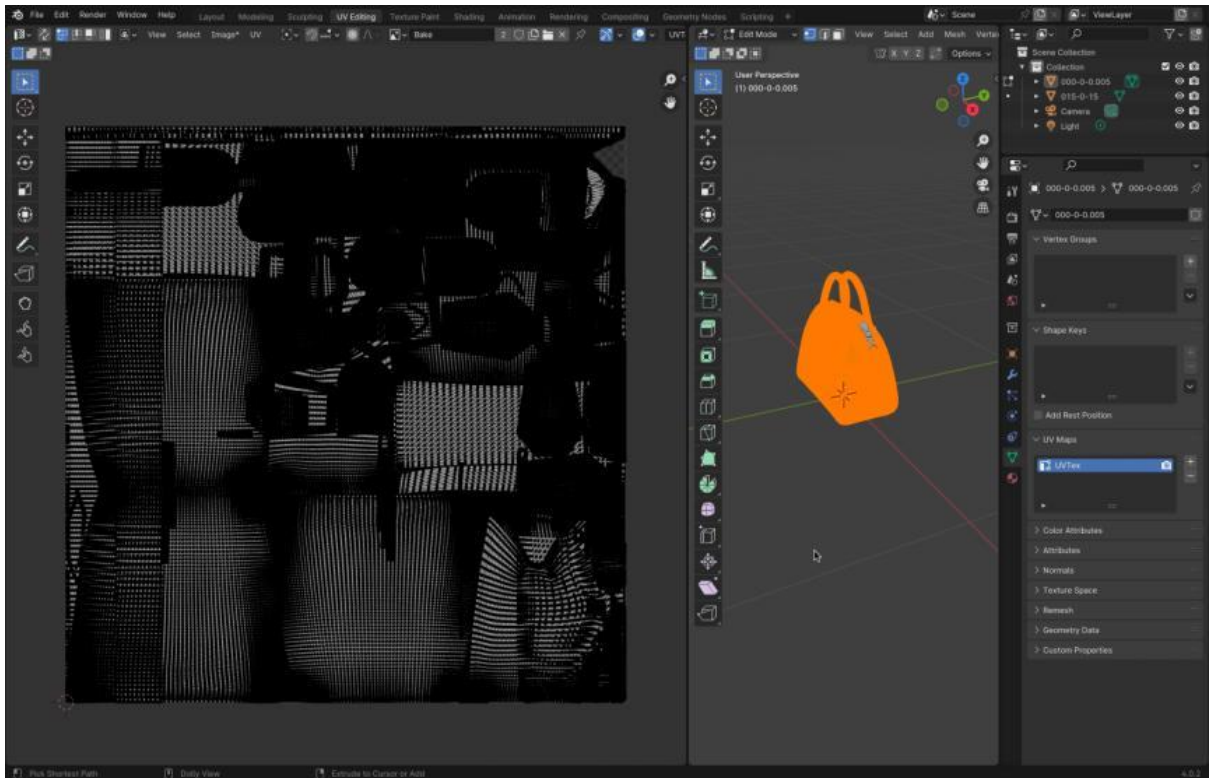


Рисунок 4.9 – Результат UV-розгортання

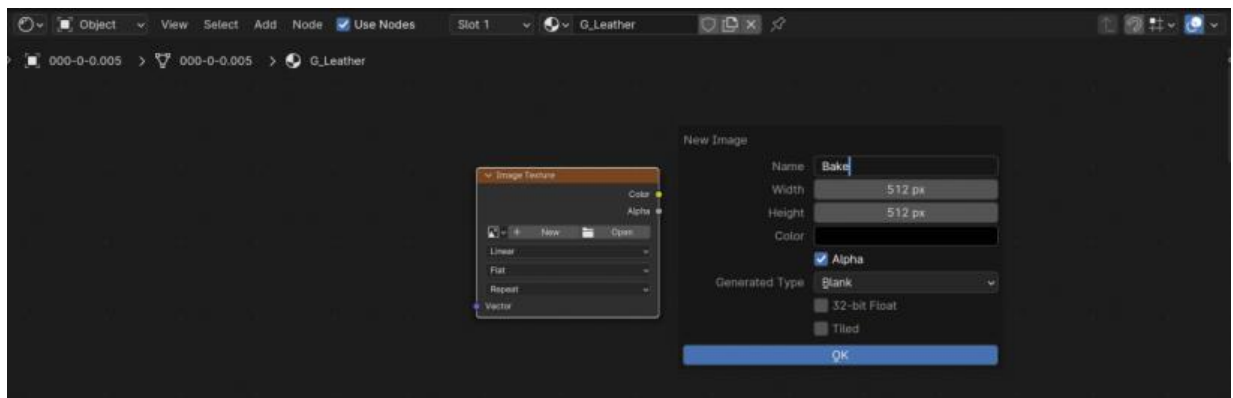


Рисунок 4.10 – Створення нового зображення для зачіпки

в) додавання нового зображення до всіх матеріалів та призначення UV-карти до них: треба перейти до кожної текстури, яка застосована до об'єкта та вставити скопійований вузол текстури зображення у шейдер матеріалу. Якщо планується запікання до нової або іншої UV-карти, відмінної від тієї, що зараз використовується для матеріалів, потрібно виконати додатковий крок. Потрібно зайти в редактор шейдерів і додати вузол UV-карти, підключити вузол карти до «цільової» текстури зображення, яка була створена раніше. На вузлі потрібно обрати UV-карту, яка була створена на першому кроці спеціально для цієї текстури (рисунок 4.11).

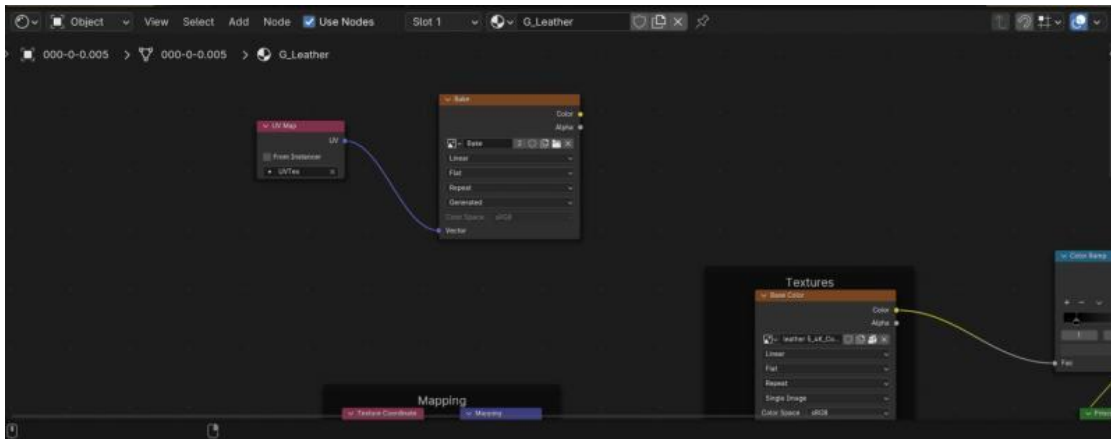


Рисунок 4.11 – Вузол нового зображення для запікання

г) налаштування параметрів запікання: налаштувань запікання знаходяться на Панелі властивостей рендерингу («Render Properties»). Тут є два важливих параметри:

1) «Тип запікання» («Bake Type») – це місце, де обирається, який тип карти потрібно запекти. Якщо запікається повний набір PBR-текстур, доведеться запікати декілька разів і вибрати різний тип запікання для кожної карти (колір, шорсткість тощо). Для основної кольорової карти обирається тип запікання «Diffuse» («Розсіяний»). Це дасть єдине запечене зображення з усіма колірними (дифузними) даними з моделі. Опція за замовчуванням «Комбіноване» («Combined») запікає все (колір, шорсткість тощо) в одне остаточне комбіноване кольорове зображення;

2) «Вплив» («Influence») – він відповідає за освітлення сцени і його вплив на запечену текстуру. Зазвичай, ця опція вимикається для обох опцій – «Прямий» («Direct») та «Непрямий» («Indirect»), адже якщо додається світло до запікання, воно може виглядати недоречно, коли об'єкт буде використано в іншій сцені. В цьому прикладі обрано комбінований тип запікання та вимкнено опції освітлення у параметрі впливу (рисунок 4.12).

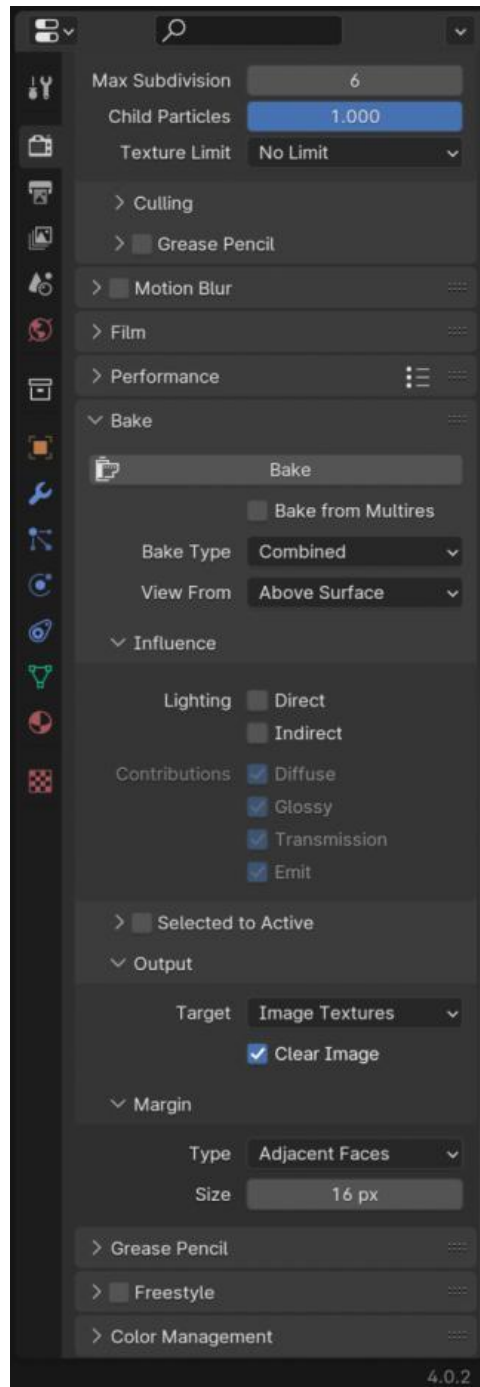


Рисунок 4.12 – Налаштування параметрів запікання

д) процес запікання: переконавшись, що вибрано лише ті об'єкти, які необхідно запекти, у вкладці властивостей рендерингу потрібно натиснути на кнопку «Запекти» («Bake»). По завершенню процесу створюється новий матеріал з вузлом текстури зображення («Image Texture»), у який додається сформований у вигляді зображення результат запікання [25].

Результат запікання текстур і матеріалів наведено на рисунку 4.13.

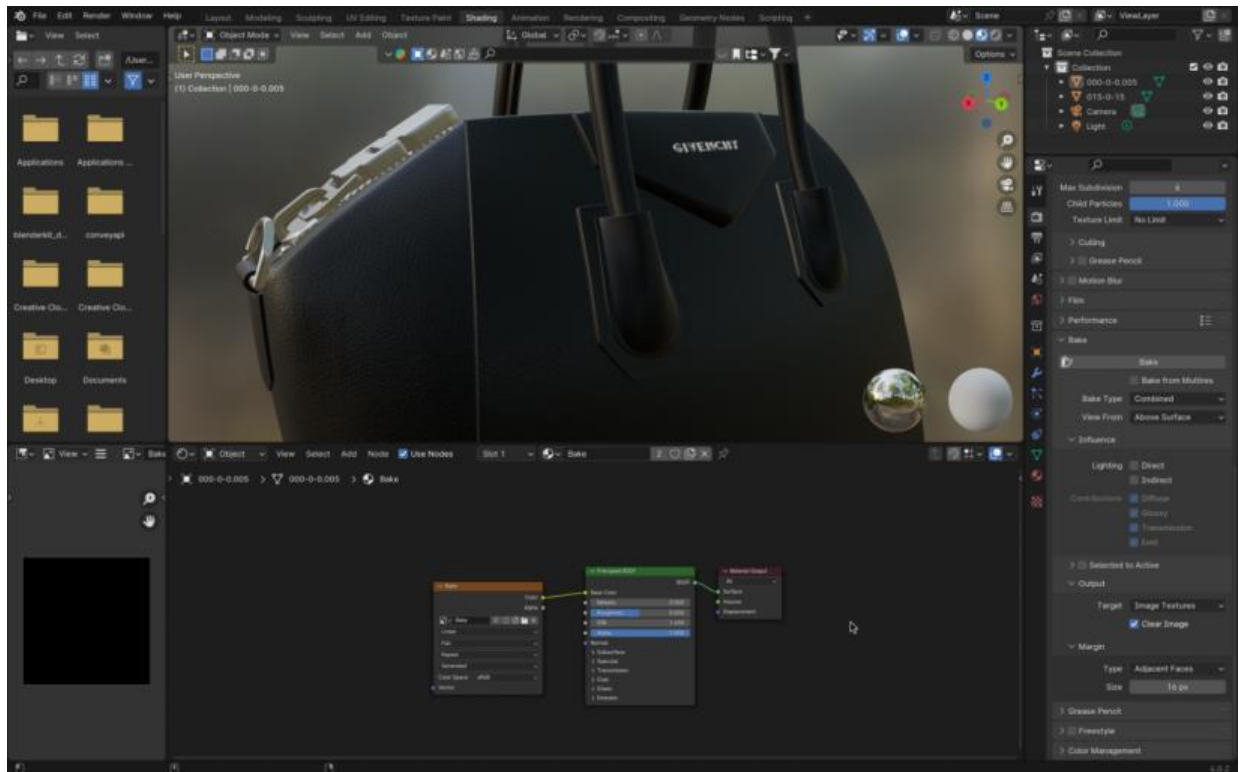


Рисунок 4.13 – Результат запікання текстур і матеріалів

У результаті такої оптимізації, розмір файлу 3D моделі сумки зменшився до 14,7 МБ. Загалом, запікання текстур є цінним інструментом у 3D-графіці, що дозволяє художникам і розробникам досягати приголомшливих візуальних ефектів, зберігаючи при цьому оптимальну продуктивність своїх проєктів.

Результати оптимізації 3D моделей всього каталогу, а саме як це відобразилось на розміру файлу та часу завантаження наведено у розділі 6.

5 РЕКОМЕНДАЦІЇ З ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ РОЗРОБКИ AR-ДОДАТКІВ

У рамках розробки AR-додатків важливим аспектом є оптимізація технологій, що використовуються, з метою підвищення продуктивності та покращення користувацького досвіду. Наступні рекомендації, що стосуються різних аспектів роботи з 3D моделями та ресурсами, можуть суттєво вплинути на ефективність AR-додатків:

а) вибір форматів 3D моделей: вибір відповідного формату для зберігання 3D моделей може значно вплинути на загальну продуктивність додатка. Формати, такі як GLTF та FBX, забезпечують ефективну передачу текстур і анімацій. GLTF є особливо корисним для веб-додатків, оскільки оптимізований для швидкого завантаження та зручності інтеграції [27];

б) зменшення кількості полігонів у 3D моделях: зменшення кількості полігонів є ключовим фактором для підвищення продуктивності AR-додатків. Використання програмного забезпечення, такого як Blender або Maya, дозволяє проводити редукцію полігонів без значних втрат якості. Методики, такі як Decimation або Retopology, можуть бути особливо корисними. Більш детальну інформацію про оптимізацію 3D моделей методом зменшення кількості полігонів наведено у розділі 4.2;

в) текстурна оптимізація: оптимізація текстур сприяє зменшенню кількості запитів до графічної пам'яті, що є особливо важливим для AR-додатків. Рекомендується використовувати формати JPEG або PNG для текстур з правильними налаштуваннями якості. Більш детальну інформацію про оптимізацію текстур і матеріалів наведено у розділі 4.3;

г) система кешування: впровадження механізму кешування для зберігання раніше завантажених моделей може значно зменшити час завантаження при повторному використанні, що є критично важливим для забезпечення швидкого відгуку системи;

д) оптимізація освітлення: застосування статичних джерел світла замість динамічного освітлення може суттєво зменшити навантаження на процесор. Використання обчислювального освітлення та глобального освітлення може підвищити візуальну якість без значних витрат ресурсів [29];

е) адаптивна оптимізація: розробка алгоритмів, що автоматично налаштовують якість моделей в залежності від характеристик пристрою, може бути корисною для досягнення кращої продуктивності. Важливо також використовувати API для перевірки апаратних можливостей пристрою;

ж) тестування на різних пристроях: регулярне тестування AR-додатків на різних платформах і пристроях дозволяє виявити потенційні проблеми з продуктивністю. Застосування емуляторів та реальних пристроїв забезпечує всебічне тестування, що сприяє виявленню й усуненню недоліків.

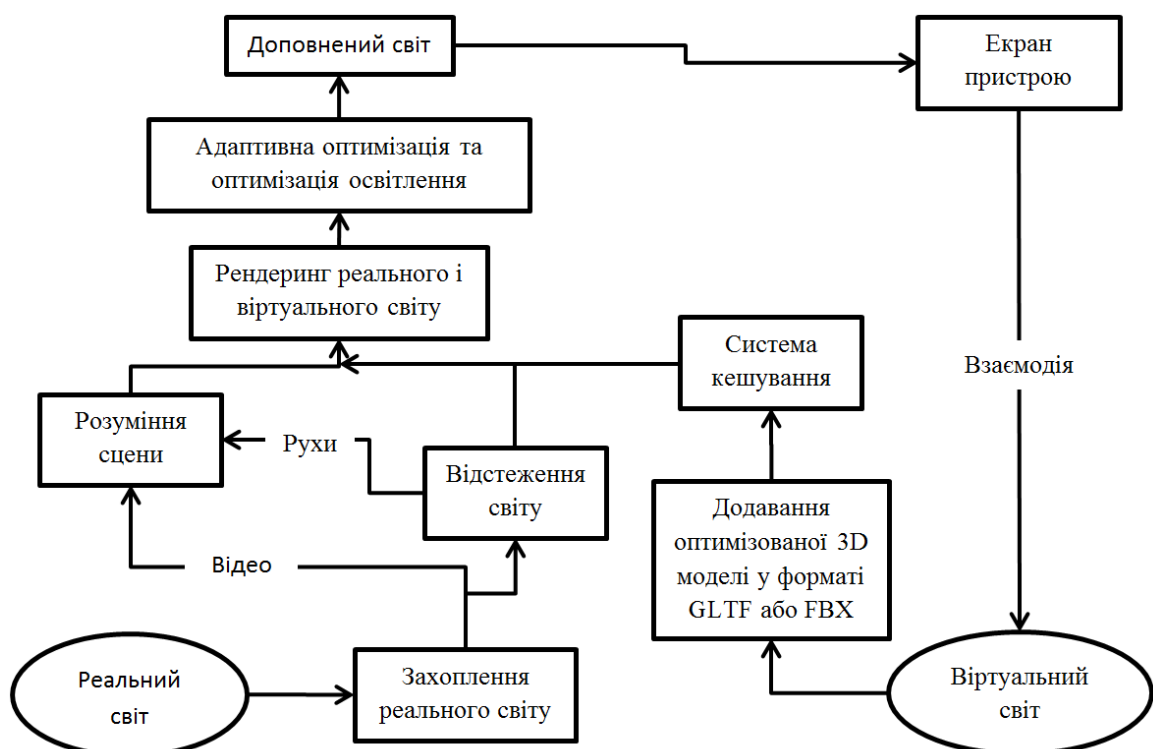


Рисунок 5.1 – Оновлена схема роботи доповненої реальності

У результаті вищезазначені рекомендації слугують основою для покращення технології розробки AR-додатків, сприяючи оптимізації 3D моделей та підвищенню загальної продуктивності. Впровадження зазначених

підходів не лише покращить користувацький досвід, але й забезпечить стабільну роботу додатків на різних платформах. Дослідження і реалізація цих технологій і методів дозволяє розробникам створювати конкурентоспроможні додатки у стрімко зростаючій сфері доповненої реальності.

Згідно з наведеними рекомендаціями, розроблено покращену схему роботи системи доповненої реальності. Вона наведена на рисунку 5.1. Важливим нововведенням є те, що у доповнений світ тепер інтегруються оптимізовані 3D моделі, представлені у форматах GLTF або FBX.

Додано блок системи кешування, який відповідатиме за зберігання раніше завантажених 3D моделей. Це суттєво покращує продуктивність, знижуючи затримки при повторному завантаженні одних і тих самих об'єктів у різних сесіях. Така система дозволяє скоротити час завантаження й значно підвищити швидкість відгуку додатку, що є критично важливим для AR-систем у реальному часі.

Після рендерингу реального та віртуального світу впроваджено блок адаптивної оптимізації та оптимізації освітлення. Цей етап дозволяє автоматично налаштовувати якість рендерингу відповідно до ресурсів пристрою. Адаптивна оптимізація забезпечує баланс між продуктивністю та якістю графіки, динамічно регулюючи рівень деталізації (LOD) та текстури моделей в залежності від відстані до об'єктів. Оптимізація освітлення, зі свого боку, сприяє зниженню навантаження на процесор, використовуючи статичні джерела світла та глобальне освітлення, що покращує якість зображення без великих витрат ресурсів [28].

6 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому розділі представлено експериментальне дослідження, яке ґрунтується на рекомендаціях щодо оптимізації 3D моделей, викладених у розділах 4 і 5. У розділі 4 розглянуто методи оптимізації 3D моделей. У розділі 5 надані ключові рекомендації для покращення технології розробки AR-додатків.

На першому етапі дослідження проведено порівняння розмірів файлів 3D моделей до і після оптимізації, використовуючи зазначені методи. Зокрема, у розділі 4.2 розглянуто методи зменшення кількості полігонів, а в розділі 4.3 – оптимізацію текстур і матеріалів. Також виконано оптимізацію 3D моделей, використовуючи два методи разом. Результати цього порівняння зведено у таблицю 6.1, а графічне відображення отриманих даних представлено на рисунку 6.1.

Таблиця 6.1 – Порівняння розмірів файлу до оптимізації 3D моделей та після

Ім'я файлу	Розмір файлу до оптимізації	Розмір файлу після оптимізації методом зменшення кількості полігонів	Розмір файлу після оптимізації методом оптимізації текстур і матеріалів	Розмір файлу після оптимізації методами зменшення кількості полігонів та оптимізації текстур і матеріалів
1	2	3	4	5
pr1.deepar	22,3 МБ	7,5 МБ	14,7 МБ	6,1 МБ
pr2.deepar	29,4 МБ	11,7 МБ	23,5 МБ	10,2 МБ
pr3.deepar	22,7 МБ	8,2 МБ	14,8 МБ	6,6 МБ
pr4.deepar	30 МБ	12,5 МБ	20,4 МБ	11,1 МБ
pr5.deepar	22,3 МБ	7,4 МБ	14,7 МБ	6,1 МБ
pr6.deepar	29,4 МБ	11,7 МБ	23,5 МБ	10,2 МБ
pr7.deepar	22,3 МБ	7,4 МБ	14,7 МБ	6,1 МБ
pr8.deepar	29,4 МБ	11,7 МБ	23,5 МБ	10,2 МБ
pr9.deepar	22,3 МБ	7,4 МБ	14,7 МБ	6,2 МБ
pr10.deepar	29,4 МБ	10,8 МБ	23,8 МБ	9,9 МБ
pr11.deepar	30,3 МБ	14,3 МБ	17,8 МБ	11,4 МБ
pr12.deepar	32,6 МБ	13,5 МБ	19,1 МБ	12 МБ
pr13.deepar	28,8 МБ	10,8 МБ	24,3 МБ	9,7 МБ
pr14.deepar	33,5 МБ	10 МБ	25,6 МБ	9,5 МБ

Продовження таблиці 6.1

1	2	3	4	5
pr15.deepar	28,8 МБ	10,9 МБ	24,3 МБ	9,7 МБ
pr16.deepar	33,5 МБ	10,2 МБ	25,6 МБ	9,5 МБ
pr17.deepar	36,1 МБ	18,3 МБ	29,1 МБ	12,2 МБ
pr18.deepar	37,9 МБ	17,5 МБ	29,8 МБ	12,8 МБ
pr19.deepar	28,8 МБ	10,7 МБ	24,3 МБ	9,7 МБ
pr20.deepar	33,5 МБ	7,3 МБ	25,6 МБ	9,5 МБ
pr21.deepar	34,6 МБ	17,5 МБ	27,1 МБ	15,3 МБ
pr22.deepar	35,2 МБ	15,5 МБ	27,3 МБ	14,9 МБ
pr23.deepar	34,9 МБ	16,4 МБ	26,9 МБ	15,2 МБ
pr24.deepar	24,4 МБ	8,1 МБ	15,7 МБ	7,8 МБ
pr25.deepar	24,6 МБ	8,4 МБ	16,3 МБ	8 МБ
pr26.deepar	24,6 МБ	8,4 МБ	16,3 МБ	8 МБ
pr27.deepar	24,6 МБ	8,4 МБ	16,3 МБ	8 МБ
pr28.deepar	40,3 МБ	15,9 МБ	22,3 МБ	7,6 МБ
pr29.deepar	40,3 МБ	15,9 МБ	22,5 МБ	7,6 МБ
pr30.deepar	40,3 МБ	15,9 МБ	22,5 МБ	7,6 МБ
pr31.deepar	40,3 МБ	15,9 МБ	22,5 МБ	7,6 МБ
pr32.deepar	40,3 МБ	15,9 МБ	22,5 МБ	7,6 МБ
pr33.deepar	50,3 МБ	28,8 МБ	27,8 МБ	16,8 МБ
pr34.deepar	5,4 МБ	4,3 МБ	5,1 МБ	4 МБ
pr35.deepar	2,7 МБ	1,6 МБ	2,3 МБ	1,5 МБ
pr36.deepar	2,7 МБ	1,6 МБ	2,3 МБ	1,5 МБ
pr37.deepar	78,5 МБ	20,3 МБ	32,4 МБ	13,4 МБ

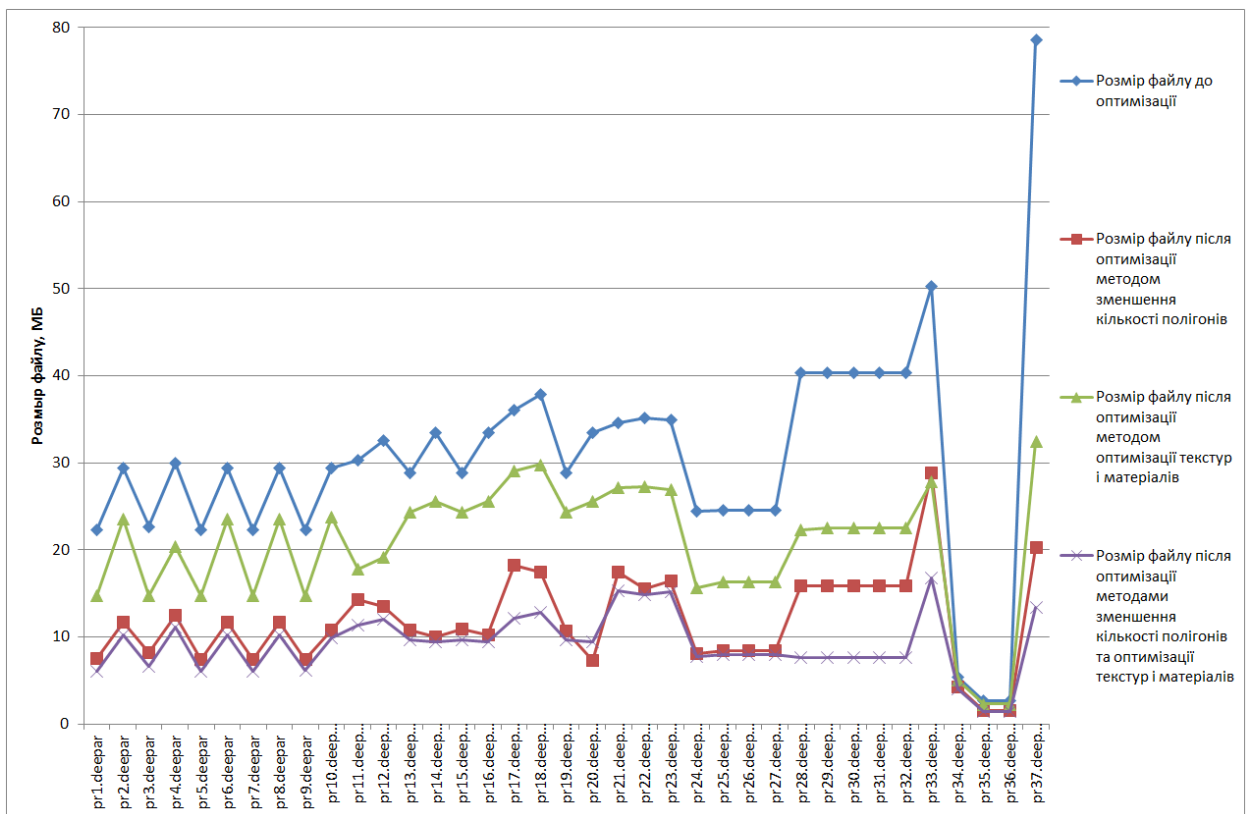


Рисунок 6.1 – Порівняння розмірів файлу до оптимізації 3D моделей та після

Наступним етапом було проведено аналіз часу завантаження 3D моделей до оптимізації та після впровадження рекомендованих змін. Результати цього етапу дослідження наведені у таблиці 6.2, а графічне зображення представлено на рисунку 6.2.

Таблиця 6.2 – Порівняння часу завантаження файлу до оптимізації 3D моделей та після

Ім'я файлу	Час завантаження файлу до оптимізації	Час завантаження файлу після оптимізації методом зменшення кількості полігонів	Час завантаження файлу після оптимізації методом оптимізації текстур і матеріалів	Час завантаження файлу після оптимізації методами зменшення кількості полігонів та оптимізації текстур і матеріалів
1	2	3	4	5
pr1.deepar	11,58 с	3,89 с	7,63 с	3,17 с
pr2.deepar	15,26 с	6,07 с	12,20 с	5,29 с
pr3.deepar	11,78 с	4,26 с	7,68 с	3,43 с
pr4.deepar	15,57 с	6,49 с	10,59 с	5,76 с
pr5.deepar	11,58 с	3,84 с	7,63 с	3,17 с
pr6.deepar	15,26 с	6,07 с	12,20 с	5,29 с
pr7.deepar	11,58 с	3,84 с	7,63 с	3,17 с
pr8.deepar	15,26 с	6,07 с	12,20 с	5,29 с
pr9.deepar	11,58 с	3,84 с	7,63 с	3,22 с
pr10.deepar	15,26 с	5,61 с	12,35 с	5,14 с
pr11.deepar	15,73 с	7,42 с	9,24 с	5,92 с
pr12.deepar	16,92 с	7,01 с	9,91 с	6,23 с
pr13.deepar	14,95 с	5,61 с	12,61 с	5,04 с
pr14.deepar	17,39 с	5,19 с	13,29 с	4,93 с
pr15.deepar	14,95 с	5,66 с	12,61 с	5,04 с
pr16.deepar	17,39 с	5,29 с	13,29 с	4,93 с
pr17.deepar	18,74 с	9,50 с	15,11 с	6,33 с
pr18.deepar	19,67 с	9,08 с	15,47 с	6,64 с
pr19.deepar	14,95 с	5,55 с	12,61 с	5,04 с
pr20.deepar	17,39 с	3,79 с	13,29 с	4,93 с
pr21.deepar	17,96 с	9,08 с	14,07 с	7,94 с
pr22.deepar	18,27 с	8,05 с	14,17 с	7,73 с
pr23.deepar	18,12 с	8,51 с	13,96 с	7,89 с
pr24.deepar	12,67 с	4,20 с	8,15 с	4,05 с
pr25.deepar	12,77 с	4,36 с	8,46 с	4,15 с
pr26.deepar	12,77 с	4,36 с	8,46 с	4,15 с
pr27.deepar	12,77 с	4,36 с	8,46 с	4,15 с
pr28.deepar	20,92 с	8,25 с	11,58 с	3,95 с
pr29.deepar	20,92 с	8,25 с	11,68 с	3,95 с

Продовження таблиці 6.2

1	2	3	4	5
pr30.deepar	20,92 с	8,25 с	11,68 с	3,95 с
pr31.deepar	20,92 с	8,25 с	11,68 с	3,95 с
pr32.deepar	20,92 с	8,25 с	11,68 с	3,95 с
pr33.deepar	26,11 с	14,95 с	14,43 с	8,72 с
pr34.deepar	2,80 с	2,23 с	2,65 с	2,08 с
pr35.deepar	1,40 с	0,83 с	1,19 с	0,78 с
pr36.deepar	1,40 с	0,83 с	1,19 с	0,78 с
pr37.deepar	40,75 с	10,54 с	16,82 с	6,96 с

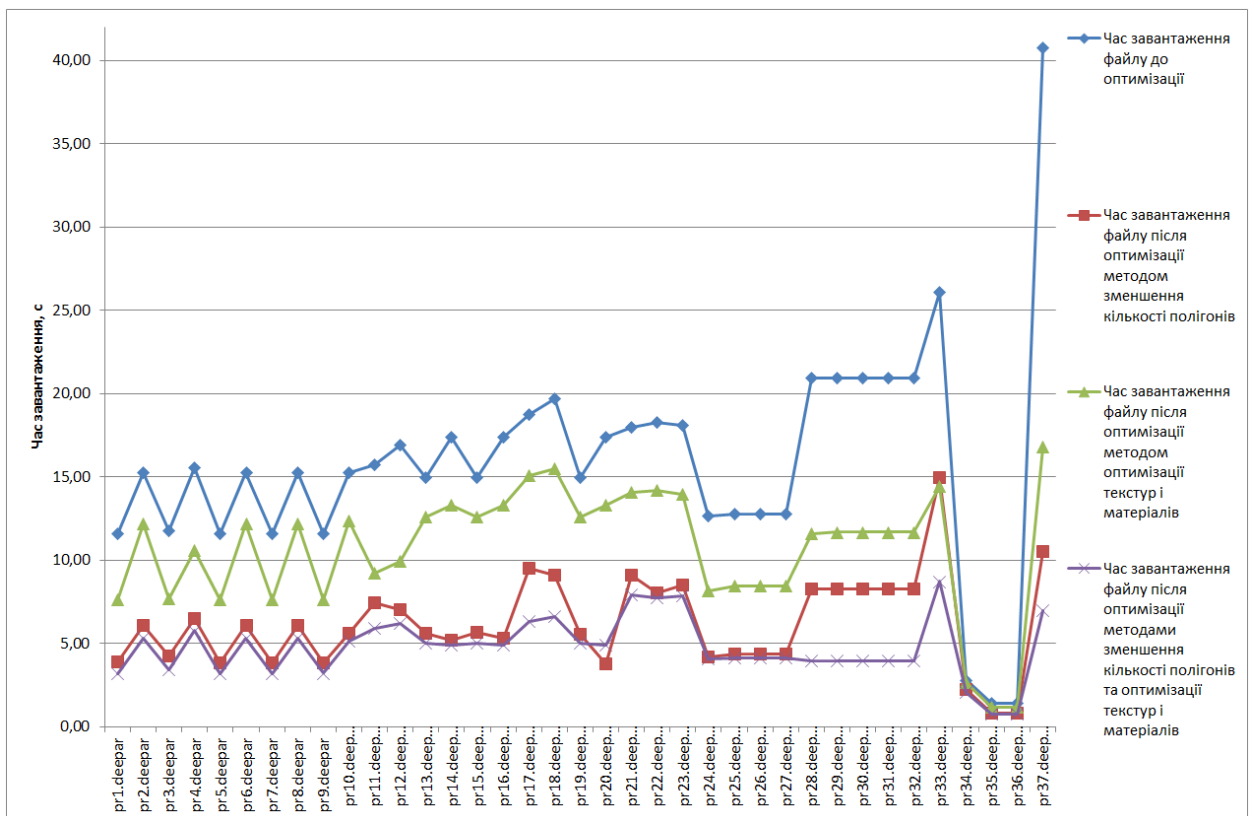


Рисунок 6.2 – Порівняння часу завантаження файлу до оптимізації 3D моделей та після

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільш ефективним є застосування двох методів оптимізації одночасно, оскільки це забезпечує найкращий ефект щодо зменшення розміру файлу, що, у свою чергу, істотно впливає на час його завантаження.

7 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

7.1 Характеристика науково-дослідної роботи

В економічній частині кваліфікаційної роботи обґрунтовано економічну доцільність оптимізації 3D моделей для AR-додатка примірки речей.

У роботі досліджено методи оптимізації 3D моделей, сформульовано загальні рекомендації з покращення технології розробки AR-додатків, проведено розрахунок економічної ефективності.

Реалізація розробленої методики дозволяє:

- зменшити розмір файлів 3D моделей;
- зменшити навантаження на пам'ять додатку, що сприяє швидшому завантаженню 3D моделей та ефективнішому управлінню ресурсами.

7.2 Характеристика науково-дослідної роботи

Під час виконання науково-дослідної роботи (НДР) проведено огляд існуючих AR-додатків для «примірки» речей, зокрема віртуальних примірочних. На основі цього огляду розроблено власний веб-додаток за допомогою DeerAR SDK, який дозволяє користувачам здійснювати примірку через доповнену реальність. У процесі роботи проведено оптимізацію 3D моделей, що у результаті зменшено їхній розмір і дозволило забезпечити кращу продуктивність на різних пристроях. Також сформульовано рекомендації щодо удосконалення технологій розробки AR-додатків. На основі отриманих даних зроблено висновок про ефективність запропонованих підходів в оптимізації 3D моделей для AR-додатка примірки речей.

Умовно НДР можна розділити на такі етапи: підготовчий, основний і заключний.

Для підготовки проаналізовано використання додатків доповненої реальності для примірки речей, визначено які складнощі виникають при використанні, підготовлено 3D моделі для власного AR-додатка.

В основній частині розроблено методику з її реалізацією у якості веб-додатка, що підтримує різні пристрої.

У заключній частині оцінено ефективність розробленого додатка, складено та захищено звіт з НДР.

Для виконання роботи залучено 3 особи, заробітна плата яких складає: розробник – 40 000,00 грн/міс.; 3D художник – 35 000,00 грн/міс.; керівник роботи – 37 500,00 грн/міс.

Проведено розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавців робіт. Середньоденна заробітна плата виконавця робіт ($Z_{\text{ср.дн.}}$) розрахована за формулою:

$$Z_{\text{ср.дн.}} = \frac{Z_{\text{ср.міс.}}}{n}, \quad (7.1)$$

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

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

Етапи виконання НДР, перелік і зміст робіт, трудомісткість їх виконання, заробітна плата виконавців робіт представлені у таблиці 7.1.

Підставивши дані до формули (7.1), отримано середньоденну заробітну плату розробника у розмірі 1818,18 грн, 3D художника – 1590,91 грн та керівника роботи – 1704,55 грн.

Таким чином, сума витрат на заробітну плату в межах виконання НДР складає 37 045,45 грн.

Таблиця 7.1 – Розрахунок трудовитрат і заробітної плати виконавців робіт

Перелік робіт	Кількість виконавців	Посада виконавця	Трудо-місткість робіт, люд.-днів	Середньоденна заробітна плата, грн	Сума заробітної плати, грн
1. Підготовчий етап					
1.1. Розробка та затвердження ТЗ	1	Керівник роботи	1	1704,55	1704,55
1.2 Підготовка 3D моделей та даних	1	3D художник	6	1590,91	9545,46
2. Основний етап					
2.1 Постановка задачі	1	Керівник роботи	1	1704,55	1704,55
2.2 Розробка методики	2	3D художник	1	1590,91	1590,91
		Розробник	1	1818,18	1818,18
2.3 Розробка додатка	1	Розробник	4	1818,18	7272,73
2.4 Формування методики експерименту	1	Керівник роботи	1	1704,55	1704,55
2.5 Проведення експериментів	1	3D художник	2	1590,91	3181,82
2.6 Обробка результатів експерименту	1	Керівник роботи	1	1704,55	1704,55
3. Заключний етап					
3.1 Оцінка використання розробленої методики	1	Керівник роботи	1	1704,55	1704,55
3.2 Технічне оформлення звіту про виконання НДР	1	Керівник роботи	3	1704,55	5113,65
Усього			22		37 045,50

7.3 Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР

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

- матеріальні витрати;
- витрати на оплату праці;
- єдиний соціальний внесок;
- амортизація основних засобів (вартість машинного часу);
- витрати на спожиту електроенергію;
- інші витрати.

Витрати на оплату праці розраховуються, виходячи з необхідного для виконання робіт складу й кількості працівників, а також із середньомісячної

заробітної плати. Відповідно до проведених розрахунків витрати на оплату праці виконавців роботи дорівнюють 37 045,50 грн.

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) є об'єднаним внеском, який регулярно і обов'язково сплачується до системи загальнообов'язкового державного соціального страхування. Цей внесок має на меті забезпечити соціальний захист у випадках, визначених законодавством, та гарантувати право на страхові виплати для застрахованих осіб та членів їхніх сімей у рамках різних видів державного соціального страхування.

Ставка єдиного соціального внеску складає 22 % від витрат на оплату праці, тобто розмір ЄСВ дорівнює 8150,01 грн.

Витрати на електроенергію розраховуються, виходячи зі споживаної потужності пристрою і тарифу на електроенергію. У цьому випадку передбачається використання 3-ох комп'ютерів потужністю 0,25 кВт/год. Вартість однієї кВт/год електроенергії прийнято у розмірі 4,32 грн. Витрати на використану обладнанням електроенергію (B_e) розраховуються за формулою:

$$B_e = M \times t \times T_{кВт}, \quad (7.2)$$

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

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

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

Підставивши значення у формулу (7.2), визначено величину витрат (B_e) на спожиту електроенергію:

$$B_e = (0,25 \times 64 \times 4,32) + (0,25 \times 72 \times 4,32) + (0,25 \times 40 \times 4,32) = 190,08 \text{ грн.}$$

Витрати на обслуговування ЕОМ визначаються з вартості ЕОМ і часу її експлуатації, після закінчення якого, вона підлягає заміні (звичайно цей час не перевищує 3-х років), протягом року ЕОМ використовується 254 робочих дні. Отже амортизація основних засобів розраховується за формулою:

$$AB = \sum_{k=1}^L \frac{BO_k}{TE_k} \times T, \quad (7.3)$$

де AB – сума амортизаційних відрахувань, нарахованих під час проведення НДР;

BO_k – вартість основних засобів k -го виду;

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

T – термін НДР, днів;

L – кількість видів обладнання.

При виконанні НДР застосовувалися 3 комп'ютери вартістю 31 000,00 грн кожен. Загальна вартість обладнання, що використовується під час виконання НДР, дорівнює 93 000,00 грн.

Підставивши відомі значення у формулу (7.3), визначено величину амортизаційних відрахувань:

$$AB = \frac{93000,00 \times 22}{762} = 2685,04 \text{ грн.}$$

До інших статей витрат відносяться такі:

– адміністративні витрати: (водопостачання, водовідведення, освітлення, опалення), які прийнято у розмірі 20 % від витрат на оплату праці;

– вартість оплати послуг зв'язку.

Адміністративні витрати складатимуть 20 % від витрат на оплату праці, тобто дорівнювати 7409,10 грн.

Вартість оплати послуг зв'язку, а саме Інтернет – 120,00 грн за 22 дні виконання НДР.

За період виконання НДР витрати на відрядження, аутсорсинг, інформаційні послуги та маркетингові заходи не мали місця. Протягом розробки матеріальні витрати також не мали місця.

Для виконання НДР використовувалося ряд програмного забезпечення та онлайн платформ. Для підготовки 3D моделей використовувався Blender, для розробки веб-додатка використовувався рушій DeerpAR SDK та програма Microsoft Visual Studio Code. Все використане програмне забезпечення та сервіси безкоштовні.

Результати розрахунку кошторису витрат, тобто одноразових витрат, на виконання НДР, наведені у таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Кошторис витрат на розробку НДР

№	Стаття витрат	Сума, грн
1	Заробітна плата	37 045,50
2	Єдиний соціальний внесок (22 % від п.1)	8150,01
3	Матеріальні витрати	–
4	Амортизація основних засобів	2685,04
5	Витрати на спожиту електроенергію	190,08
6	Інші витрати	
6.1	Адміністративні витрати (20 % від п.1)	7409,10
6.2	Вартість послуг зв'язку	120,00
7	Усього витрати	55 599,73

Таким чином, кошторис витрат на виконання даної НДР складає 55 599,73 грн.

7.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи

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

Відповідно до теми цієї роботи можна зробити висновок, що результатом впровадження НДР є зменшення розмірів файлів 3D моделей та часу їх завантаження у додатку.

Результат від впровадження НДР визначається за формулою:

$$\Delta P_j = |X_{бj} - X_{нj}|, \quad (7.4)$$

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

m – кількість досліджуваних характеристик;

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

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

У якості досліджуваної характеристики обрано розмір файлу та час завантаження. До впровадження оптимізації розмір файлу pr1.deepar становив 22,3 МБ, а час завантаження складало 11,58 с; після оптимізації розмір цього файлу становив 6,1 МБ, а час завантаження складало 3,17 с.

Таблиця 7.3 – Результат від впровадження НДР

Ім'я файлу	Розмір файлу, МБ			Час завантаження файлу, с		
	до оптимізації	після оптимізації	різниця	до оптимізації	після оптимізації	різниця
1	2	3	4	5	6	7
pr1.deepar	22,3	6,1	16,2	11,58	3,17	8,41
pr2.deepar	29,4	10,2	19,2	15,26	5,29	9,97
pr3.deepar	22,7	6,6	16,1	11,78	3,43	8,35
pr4.deepar	30	11,1	18,9	15,57	5,76	9,81
pr5.deepar	22,3	6,1	16,2	11,58	3,17	8,41
pr6.deepar	29,4	10,2	19,2	15,26	5,29	9,97
pr7.deepar	22,3	6,1	16,2	11,58	3,17	8,41
pr8.deepar	29,4	10,2	19,2	15,26	5,29	9,97
pr9.deepar	22,3	6,2	16,1	11,58	3,22	8,36
pr10.deepar	29,4	9,9	19,5	15,26	5,14	10,12
pr11.deepar	30,3	11,4	18,9	15,73	5,92	9,81
pr12.deepar	32,6	12	20,6	16,92	6,23	10,69
pr13.deepar	28,8	9,7	19,1	14,95	5,04	9,91
pr14.deepar	33,5	9,5	24	17,39	4,93	12,46

Продовження таблиці 7.3

1	2	3	4	5	6	7
pr15.deepar	28,8	9,7	19,1	14,95	5,04	9,91
pr16.deepar	33,5	9,5	24	17,39	4,93	12,46
pr17.deepar	36,1	12,2	23,9	18,74	6,33	12,41
pr18.deepar	37,9	12,8	25,1	19,67	6,64	13,03
pr19.deepar	28,8	9,7	19,1	14,95	5,04	9,91
pr20.deepar	33,5	9,5	24	17,39	4,93	12,46
pr21.deepar	34,6	15,3	19,3	17,96	7,94	10,02
pr22.deepar	35,2	14,9	20,3	18,27	7,73	10,54
pr23.deepar	34,9	15,2	19,7	18,12	7,89	10,23
pr24.deepar	24,4	7,8	16,6	12,67	4,05	8,62
pr25.deepar	24,6	8	16,6	12,77	4,15	8,62
pr26.deepar	24,6	8	16,6	12,77	4,15	8,62
pr27.deepar	24,6	8	16,6	12,77	4,15	8,62
pr28.deepar	40,3	7,6	32,7	20,92	3,95	16,97
pr29.deepar	40,3	7,6	32,7	20,92	3,95	16,97
pr30.deepar	40,3	7,6	32,7	20,92	3,95	16,97
pr31.deepar	40,3	7,6	32,7	20,92	3,95	16,97
pr32.deepar	40,3	7,6	32,7	20,92	3,95	16,97
pr33.deepar	50,3	16,8	33,5	26,11	8,72	17,39
pr34.deepar	5,4	4	1,4	2,8	2,08	0,72
pr35.deepar	2,7	1,5	1,2	1,4	0,78	0,62
pr36.deepar	2,7	1,5	1,2	1,4	0,78	0,62
pr37.deepar	78,5	13,4	65,1	40,75	6,96	33,79

Підставивши відповідні значення розміру файлу та часу завантаження до формули (7.4), визначено результат від впровадження НДР у чисельному вигляді:

$$\Delta P_1 = |22,3 - 6,1| = 16,2 \text{ МБ},$$

$$\Delta P_2 = |11,58 - 3,17| = 8,41 \text{ с}.$$

Аналогічні розрахунки були також проведені для інших 3D моделей, результати зведені у таблиці 7.3.

Таким чином, отриманий результат свідчить про те, що завдяки результату від впровадження НДР, оптимізовані 3D моделі мають значно менший розмір та забезпечується менший час їх завантаження.

7.5 Визначення економічної ефективності результатів НДР

Для визначення економічної ефективності результатів НДР необхідно порівняти витрати на розробку НДР з отриманими результатами.

Основним показником економічної ефективності науково-дослідної роботи є коефіцієнт «ефект-витрати», який розраховується за формулою:

$$K_{ев} = \frac{\Delta P_j}{B_p}, \quad (7.5)$$

де B_p – витрати (кошторисна вартість) на виконання НДР, грн;

$K_{ев}$ – коефіцієнт «ефект-витрати», який відбиває, наскільки кожна гривня витрат НДР змінює j -ту характеристику досліджуваного процесу.

Підставивши раніше визначені значення до формули (7.5), розраховано чисельне значення коефіцієнту «ефект-витрати» розробленого рішення порівняно з загальними рішеннями. Так, для файлу `pr1.deepar`:

$$K_{ев} (\text{розмір файлу}) = \frac{16,2}{55599,66} \times 100\% = 0,029\%,$$

$$K_{ев} (\text{час завантаження}) = \frac{8,41}{55599,66} \times 100\% = 0,015\%.$$

Аналогічні розрахунки були також проведені для інших 3D моделей, результати зведені у таблицю 7.4.

У результаті проведених досліджень, можна зробити висновок про те, що НДР має позитивний показник економічної ефективності. Використовуючи розроблену методику реалізовану у додатку, можна стверджувати, що кожна гривня витрат на розробку забезпечує зменшення розмірів файлів 3D моделей та часу їх завантаження.

Таблиця 7.4 – Результат коефіцієнту «ефект-витрати»

Ім'я файлу	$K_{ев(розмір\ файлу)}, \%$	$K_{ев(час\ завантаження)}, \%$
pr1.deepar	0,029	0,015
pr2.deepar	0,035	0,018
pr3.deepar	0,029	0,015
pr4.deepar	0,034	0,018
pr5.deepar	0,029	0,015
pr6.deepar	0,035	0,018
pr7.deepar	0,029	0,015
pr8.deepar	0,035	0,018
pr9.deepar	0,029	0,015
pr10.deepar	0,035	0,018
pr11.deepar	0,034	0,018
pr12.deepar	0,037	0,019
pr13.deepar	0,034	0,018
pr14.deepar	0,043	0,022
pr15.deepar	0,034	0,018
pr16.deepar	0,043	0,022
pr17.deepar	0,043	0,022
pr18.deepar	0,045	0,023
pr19.deepar	0,034	0,018
pr20.deepar	0,043	0,022
pr21.deepar	0,035	0,018
pr22.deepar	0,037	0,019
pr23.deepar	0,035	0,018
pr24.deepar	0,030	0,016
pr25.deepar	0,030	0,016
pr26.deepar	0,030	0,016
pr27.deepar	0,030	0,016
pr28.deepar	0,059	0,031
pr29.deepar	0,059	0,031
pr30.deepar	0,059	0,031
pr31.deepar	0,059	0,031
pr32.deepar	0,059	0,031
pr33.deepar	0,060	0,031
pr34.deepar	0,003	0,001
pr35.deepar	0,002	0,001
pr36.deepar	0,002	0,001
pr37.deepar	0,117	0,061

Роботу, в цілому, можна вважати ефективною або такою, що має високий науковий та технічний рівень.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання роботи проведено аналіз предметної області, що включає в себе детальний опис основної ідеї розроблюваного додатка доповненої реальності для «примірки» речей. Сформульовано завдання, що визначає основні цілі проєкту, а також здійснено огляд існуючих аналогів, що функціонують на ринку з метою виявити сильні та слабкі сторони конкурентів, а також можливості для вдосконалення пропонованого рішення.

Далі, методом лінійної згортки обрано програмне забезпечення, що забезпечує створення та обробку 3D моделей, а також рушій для розробки AR-додатка. Розроблені вимоги до інтерфейсу клієнтської частини системи, що було здійснено за допомогою UML-діаграми варіантів використання системи, що відображає можливі сценарії взаємодії користувача з додатком.

У рамках розробки AR-ефектів за допомогою DeepAR Studio створено ефекти для 37 товарів. На основі цих розробок реалізовано веб-додаток для «примірки» речей GivAR, написаний з використанням мов програмування JavaScript та TypeScript, а також DeepAR SDK.

Для покращення продуктивності роботи додатка проведена оптимізація 3D моделей, що включала в себе зменшення кількості полігонів, а також оптимізацію текстур і матеріалів. У процесі виконання цих заходів проведена серія експериментів, результати яких продемонстрували, як оптимізація впливає на розмір файлів та час завантаження. Сформульовано загальні рекомендації з покращення технології розробки AR-додатків.

В економічній частині виконано розрахунок одноразових витрат на розробку науково-дослідної роботи (НДР), визначено оцінку результатів від впровадження НДР та економічну ефективність. В цілому, роботу можна вважати ефективною або такою, що має високий науковий та технічний рівень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кулішова Н.Є., Ткаченко В.П. Методичні вказівки з виконання атестаційної роботи здобувачів вищої освіти на другому (магістерському) рівні для студентів усіх форм навчання спеціальності 186 «Видавництво та поліграфія». Харків: ХНУРЕ, 2020. 49 с.
2. Kulishova N., Yerokhina D. Use of Augmented Reality in School's Physics Course // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. 2024. Т. 1 С. 346-347.
3. Кулішова Н.Є., Зуєвський Д.Р. Створення кольорового атласу, особливості створення розгорток для його використання // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. 2022. Т. 1. С. 118-120.
4. Кулішова Н.Є., Ромащенко Ю.Д. Дослідження завдань для інтерактивного додатку з доповненою реальністю // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. 2021. Т.1. С. 81-82.
5. Kulishova N., Suchkova, N. Impact of the Textbooks' Graphic Design on the Augmented Reality Applications Tracking Ability. In: Advances in Computer Science for Engineering and Education, 2019. Springer. P. 692-701.
6. Кулішова Н.Є., Зуєвський Д.Р. Створення та використання динамічних масок при розробці трьохмірних моделей для мобільних ігр // Технологія і техніка друкарства. 2021. Вип. 4 (74). С. 95-102. DOI: 10.20535/2077-7264.4(74).2021.247639.
7. Li Dan, Shang Yanlei. Design and Implementation of Augmented Reality Browser for Mobile Terminal // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 490. 042017. 10.1088/1757-899X/490/4/042017.
8. Кулішова Н.Є., Сахаров І.Л. Дослідження і розробка компонентів AR-дodatка примірки речей // Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. 2024. Т. 2. С. 239-240.
9. AR Shoes and Virtual Sneakers Try-On. URL: <https://wanna.fashion/sneakers-try-on> (дата звернення: 30.09.2024).

10. Reactive Reality Has Launched an Avatar-Based Shopping App Called PICTOFiT. URL: <https://www.trendhunter.com/trends/pictofit> (дата звернення: 30.09.2024).

11. PICTOFiT Virtual Styling AI for E-Commerce. URL: <https://www.reactivereality.com/virtual-styling> (дата звернення: 30.09.2024).

12. Warby Parker Mobile Apps. URL: <https://www.warbyparker.com/app> (дата звернення: 30.09.2024).

13. Warby Parker Virtual Try-on: How Accurate Is the App?. URL: <https://www.businessinsider.com/guides/style/warby-parker-virtual-try-on-app-review> (дата звернення: 30.09.2024).

14. DeepAR SDK. URL: <https://docs.deepar.ai/deepar-sdk/introduction/> (дата звернення: 02.10.2024).

15. SDK Features. URL: <https://docs.deepar.ai/deepar-sdk/specification/sdk-features/> (дата звернення: 02.10.2024).

16. The Freedom to Create. URL: <https://www.blender.org/about/> (дата звернення: 03.10.2024).

17. What Is Blender (Software)? – Simply Explained. URL: <https://all3dp.com/2/what-is-blender-software-simply-explained/> (дата звернення: 03.10.2024).

18. Getting started with DeepAR Web. URL: <https://docs.deepar.ai/deepar-sdk/platforms/web/getting-started/> (дата звернення: 05.10.2024).

19. DeepAR Effects. URL: <https://docs.deepar.ai/deepar-sdk/filters/> (дата звернення: 05.10.2024).

20. Optimizing your 3D models for better video game performance. URL: <https://www.sloyd.ai/blog/optimizing-your-3d-models-for-better-video-game-performance> (дата звернення: 05.09.2024).

21. Everything You Need to Know About the Optimization of 3D Assets. URL: <https://ikarus3d.com/media/3d-blog/everything-you-need-to-know-about-the-optimization-of-3d-assets/> (дата звернення: 05.09.2024).

22. 3D Model Optimization: Pros and Cons. URL: <https://overlyapp.com/blog/3d-model-optimization-pros-cons/> (дата звернення: 05.09.2024).

23. Reducing Polygons in Blender Using Decimate Modifier. URL: <https://www.tripo3d.ai/blog/collect/reducing-polygons-in-blender-using-decimate-modifier-tbip-o9jqu8> (дата звернення: 06.09.2024).

24. Decimate Modifier – Blender 4.2 Manual. URL: <https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/modifiers/generate/decimate.html> (дата звернення: 06.09.2024).

25. Texture Baking in Blender 3D (Step-By-Step). URL: <https://brandon3d.com/texture-baking/> (дата звернення: 07.09.2024).

26. Tips to Optimize Game Assets in Blender. URL: <https://cgcookie.com/posts/3-ways-to-optimize-game-assets-in-blender> (дата звернення: 07.09.2024).

27. glTF: The JPEG of 3D. URL: <https://www.khronos.org/gltf/> (дата звернення: 07.10.2024).

28. What is LOD (Level of Detail) in BIM. URL: <https://bim-prove.com/post/what-is-lod-level-of-detail-in-bim> (дата звернення: 07.10.2024).

29. Configuring Global Environment Lighting Settings – Unity 2019.4. URL: <https://learn.unity.com/tutorial/configuring-global-environment-lighting-settings-2018#> (дата звернення: 08.10.2024).

30. How to Test DeepAR Web SDK Using Ngrok. URL: <https://docs.deepar.ai/deepar-sdk/platforms/web/tutorials/testing-with-ngrok/> (дата звернення: 10.10.2024).

31. Tracking Technology in Augmented Reality. URL: <https://encyclopedia.pub/entry/39656> (дата звернення: 12.10.2024).