

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки


Факультет Комп'ютерних наук
(повна назва)

Кафедра Медіасистеми та технології
(повна назва)


КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

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

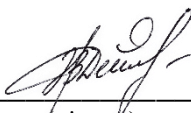
Дослідження процесу створення та анімації
реалістичного 3D-портрета людини
(тема)

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

Валерій ШАХВОРОСТОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 186 Видавництво та поліграфія
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма
Технології електронних мультимедійних видань

Керівник  проф. Олександр ГРИГОР'ЄВ
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту
Завідувач кафедри МСТ


(підпис)
Жанна ДЕЙНЕКО
(власне ім'я, прізвище)

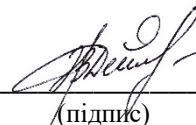
2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри МСТ _____



(підпис)

« 03 » листопада 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві _____ *Шахворостову Валерію Вячеславовичу* _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ *Дослідження процесу створення та анімації
реалістичного 3D-портрета людини* _____

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

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 17 грудня 2025 р. _____

3. Вихідні дані до роботи

Програмне забезпечення: – Unreal Engine 5, Blender, PolyCam, PollyHammer, MetaHuman Creator, Live Link Face.


4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Умови до візуальної складової технічного завдання; Специфіка та вимоги до створення 3D-моделі людини; Аналіз літератури та актуальності проблем створення 3D-моделі людини; Аналіз додаткових програм, що використовуються у створенні 3D-людини; Обробка результатів дослідно-експериментальної роботи; Впровадження гібридного методу в робочий процес; Збір даних зовнішності людини та створення первинної геометрії; Інтеграція моделі у середовище Unreal Engine 5; Редагування зовнішності та створення тіла у MetaHuman Creator; Створення цілісної 3D-моделі; Підключення та налаштування системи лицьової анімації; Фіналізація візуального образу; Економічна частина; Висновки.

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

Актуальність; Аналіз літератури за темою дослідження; Формулювання проблеми; Мета; Цілі та задачі дослідження; Гіпотеза; Розробка 3D-моделі; Розробка анімації 3D-моделі; Тестування 3D-моделі; Економічна частина; Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Основна частина	проф. Григор'єв О.В.		16.12.2025
Економічна частина	доц. Потій О.О.		15.12.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	03.11.2025	виконано
2	Аналіз літератури	06.11.2025	виконано
3	Формулювання гіпотези	13.11.2025	виконано
4	Проведення експерименту	15.11.2025	виконано
5	Опис процесу практичної частини	27.11.2025	виконано
6	Економічна частина	09.12.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	15.12.2025	виконано
8	Оформлення графічної частини	16.12.2025	виконано
9	Захист кваліфікаційної роботи	18.12.2025	виконано

Дата видачі завдання 03 листопада 2025 р.

Здобувач



(підпис)

Керівник роботи



(підпис)

проф. Олександр ГРИГОР'ЄВ

(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 64 с., 10 табл., 18 рис., 24 джерел.

ДОСЛІДЖЕННЯ, ЕКСПЕРИМЕНТ, 3D МОДЕЛЮВАННЯ, АНІМАЦІЯ, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.

Метою роботи є дослідження процесу створення та анімації реалістичного 3D-портрета людини шляхом розробки та впровадження гібридного методу створення, що поєднує технології фотограмметрії, процедурної генерації та ручного доопрацювання.

Об'єктом дослідження є процес створення реалістичних 3D-моделей людей для інтерактивних середовищ та медіа-контенту з використанням сучасних інструментів автоматизації.

Предметом дослідження є методика використання фотограмметрії та інструментарію MetaHuman для автоматизованої генерації топології та ригу персонажа, а також способи інтеграції отриманої моделі в сторонні 3D-редактори для редагування.

Результати дослідження дозволили експериментально підтвердити ефективність гібридного методу, який скорочує час виробництва на 45% порівняно з традиційним ручним моделюванням без втрати якості візуального образу. На основі розробленої методики було створено 3D-портрет людини у стилістиці наукової фантастики, що демонструє практичне застосування технології. Підсумком роботи стало формування рекомендацій щодо оптимізації технологічного процесу створення цифрових двійників AAA-рівня в умовах обмежених часових та людських ресурсів.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 64 p., 10 tabl., 18 fig., 24 sources.

RESEARCH, EXPERIMENT, 3D MODELLING, ANIMATION, DIGITAL TWIN, TECHNOLOGICAL PROCESS.

The aim of this work is to study the process of creating and animating realistic 3D portraits of people by developing and implementing a hybrid creation method that combines photogrammetry, procedural generation, and manual refinement technologies.

The object of the study is the process of creating realistic 3D models of people for interactive environments and media content using modern automation tools.

The subject of the research is the methodology of using photogrammetry and MetaHuman tools for automated generation of character topology and rigging, as well as methods of integrating the resulting model into third-party 3D editors for editing.

The results of the study experimentally confirmed the effectiveness of the hybrid method, which reduces production time by 45% compared to traditional manual modelling without losing the quality of the visual image. Based on the developed methodology, a 3D portrait of a person in the style of science fiction was created, demonstrating the practical application of the technology. The result of the work was the formation of recommendations for optimising the technological process of creating AAA-level digital twins in conditions of limited time and human resources.

ЗМІСТ

	С.
СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ	8
ВСТУП.....	10
1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ	13
1.1 Умови до візуальної складової технічного завдання.....	13
1.2 Специфіка та вимоги до створення 3D-моделі людини	14
2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ВІДПОВІДНО ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	16
2.1 Основи 3D-графіки.....	16
2.2 Аналіз літератури та актуальності створення 3D-моделі людини.....	17
2.3 Огляд існуючих методів створення 3D-портрету людини.....	19
2.4 Аналіз програмних пакетів для створення 3D-людини.....	20
2.5 Аналіз додаткових програм для створення 3D-людини.....	23
3 ФОРМУЛЮВАННЯ ГІПОТЕЗИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	26
4.1 Організація дослідно-експериментальної роботи.....	26
4.2 Обробка результатів дослідно-експериментальної роботи.....	29
4.3 Висновки дослідно-експериментальної роботи.....	34
4.4 Впровадження гібридного методу в робочий процес.....	35
5 ОПИС ПРОЦЕСУ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ	38
5.1 Збір даних зовнішності людини та створення первинної геометрії	38
5.2 Редагування дефектів скану 3D-моделі.....	39
5.3 Інтеграція моделі у середовище Unreal Engine 5	41
5.4 Редагування зовнішності та створення тіла у MetaHuman Creator	43
5.5 Створення цілісної 3D-моделі	45
5.6 Підключення та налаштування системи лицьової анімації.....	47
5.7 Фіналізація візуального образу.....	50
6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	53
6.1 Характеристика науково-дослідної роботи.....	53

6.2	Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата	53
6.3	Розрахунок одноразових витрат на розробку НДР	55
6.4	Оцінка результатів науково-дослідної роботи.....	58
6.5	Визначення економічної ефективності результатів НДР	59
	ВИСНОВКИ	61
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	63

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

DNA (дезоксирибонуклеїнова кислота, англ. Deoxyribonucleic acid) – це унікальний набір параметричних даних, що визначає топологію, ріг, текстури та поведінку лицьової анімації цифрового персонажа, подібно до того, як біологічна ДНК визначає риси живого організму.

AAA – це неформальний стандарт класифікації у відеоігровій індустрії, що позначає високобюджетні проекти з найвищим рівнем якості графіки та технічного виконання.

VR (віртуальна реальність, англ. Virtual Reality) – це технологія створення імерсивного цифрового середовища, яке сприймається людиною через спеціальні засоби виведення інформації (шоломи, гарнітури) та взаємодіє з нею через контролери та системи відстеження руху.

LED (світлодіодний дисплей, англ. Light-Emitting Diode display) – це технологія візуалізації, що базується на використанні напівпровідникових світлодіодів для формування зображення.

CGI (зображення, згенеровані комп'ютером, англ. Computer-Generated Imagery) – це загальний термін, що позначає використання комп'ютерної графіки для створення або редагування зображень у мистецтві, друкованих медіа, кінематографі, на телебаченні та в іграх.

PBR (фізично коректний рендеринг, англ. Physically Based Rendering) – це модель шейдингу та рендерингу, що прагне імітувати взаємодію світла з поверхнями так, як це відбувається у реальному світі.

Топологія (англ. Topology) – це структура організації полігональної сітки, що визначає розташування вершин, ребер та граней об'єкта.

Рігінг (англ. Rigging) – це процес створення віртуального кісткового скелета та системи контролерів для 3D-моделі. Це технічний етап підготовки персонажа, який дозволяє аніматорам керувати його рухами.

Меш (англ. Mesh) – це структурна основа тривимірної моделі, що складається з набору вершин, ребер та граней, які разом визначають геометрію та об'ємну форму об'єкта у віртуальному просторі.

Скіннінг (англ. Skinning) – це технічний процес у 3D-анімації, що полягає у прив'язці геометричної поверхні моделі до системи віртуальних кісток. Суть процесу полягає у визначенні вагових коефіцієнтів, які вказують, наскільки сильно рух конкретної кістки впливає на переміщення відповідних вершин сітки.

UV (UV-розгортка, англ. UV mapping) – це процес перенесення тривимірної поверхні 3D-моделі на двовимірну площину для накладання текстур.

Скульптинг (англ. Digital Sculpting) – це метод тривимірного моделювання, що імітує традиційний процес роботи з пластичними матеріалами, такими як глина. Скульптинг дозволяє інтуїтивно змінювати форму об'єкта за допомогою пензлів.

Ретопологія (англ. Retopology) – це процес створення нової, оптимізованої полігональної сітки поверх існуючої високодеталізованої моделі, отриманої, як правило, методом скульптингу або 3D-сканування.

Пайплайн (англ. Production Pipeline) – це чітко визначена послідовність технологічних етапів та процесів, через які проходить цифровий контент від моменту створення концепції до фінального релізу.

UE5 – Unreal Engine 5 – Нереальний рушій 5.

МНС – MetaHumanCreator – МетаЛюдинаТворець.

ПК – персональний комп'ютер.

ПЗ – програмне забезпечення.

ВСТУП

У нашому світі люди стикаються з цифровим контентом на кожному кроці – від блокбастерів у кінотеатрах та відеоігор до реклами кросівок, архітектурних візуалізацій та VR-розваг. Один із ключових аспектів, який впливає на сприйняття цього контенту – це якість CGI та реалістичність 3D-графіки. Створенням цих віртуальних світів займаються 3D-художники, але з урахуванням шаленого розвитку технологій, неймережі стають все більш популярними і вносять справжні революційні зміни у цю сферу.

Робота професійного 3D-артиста базується не тільки на створенні гарної картинки, а й на розумінні багатьох технічних та художніх факторів, таких як: композиція кадру, фізика світла, правильна топологія моделі для анімації та оптимізація сцени під конкретний рушій. Саме робота професійного 3D-художника з персонажів традиційно базується не тільки на творчому баченні, а й на глибокому розумінні анатомії, правильної топології та технічних обмежень. Це складний і трудомісткий процес: скульптинг пор шкіри, ручна ретопологія, налаштування ваги кісток. І не дивлячись на те, що класичні методи дають високий контроль, сучасні технології, можуть бути кращими за ручну працю за декількома пунктами, такими як: швидкість отримання базової геометрії та автоматизація налаштування скелету.

Важливим аспектом є розробка ефективних стратегій використання гібридних методів для оптимізації створення персонажів. Це важливо як для прогресу в сфері CGI, так і для конкретних практичних застосувань. Незважаючи на можливості автоматизації, важливо поєднати точність сканування з гнучкістю процедурних інструментів.

Актуальність роботи полягає у зростаючій потребі високоякісного контенту. Зараз існує значний попит на віртуальних артистів або їх цифрових копії для виведення на великі екрани, і від якості моделі залежить ефект присутності та емоційний відгук публіки.

Однією з ключових проблем є пошук оптимального співвідношення між часом виробництва та фотореалізмом. Це стає особливо актуальним з урахуванням того, що ручний скульптинг займає тижні, а індустрія вимагає результату швидко. Використання гібридної технології може призвести до значного прискорення процесу розробки без втрати ідентичності персонажа.

Ще одною критичною проблемою є технічна складність процесів ригінгу та скіннінгу. У класичному пайплайні побудова коректної кінематичної системи, особливо для реалістичної лицьової анімації, вимагає від фахівця глибоких знань анатомії. Ручне налаштування ваги кісток в 3D залишається одним із найбільш трудомістких етапів, де найменша похибка призводить до неприродних деформацій сітки та артефактів під час руху. Це створює складність у виробництві, оскільки виправлення помилок скіннінгу часто потребує повернення на попередні етапи розробки, що є критичним фактором в умовах обмеженого часу на реалізацію проєкту.

Не менш значним викликом є досягнення переконливої анімації обличчя, зокрема реалізації ліпсинку та коректної роботи м'язів. Людське сприйняття надзвичайно чутливе до найменших неприродних мікрорухів. У традиційному підході створення реалістичної артикуляції вимагає кропіткого ручного налаштування фонем та переходів між ними, а імітація скорочення м'язів та утворення зморшок потребує створення сотень корегуючих форм у моделі. Цей процес є надзвичайно ресурсовитратним і часто не гарантує фотореалістичного результату без використання дорогавартісних систем захоплення руху професійного рівня, що робить його малодоступним для проєктів з обмеженим бюджетом.

Основними завданнями дослідження є:

- порівняння якісних характеристик персонажів, створених традиційним методом та за допомогою гібридного методу підходу, зокрема, оцінка точності передачі рис обличчя та якості топології;

- дослідження можливостей технології «Mesh to MetaHuman» у процесі адаптації геометрії 3D-скану людини до вимог анімації;

- вивчення ефективності різних методів анімації, а саме, процесу створення анімації за допомогою Live Link Face та ріггінгу тіла через Blender;
- аналіз можливостей і обмежень використання стандартного MetaHuman-рігу для специфічних сценічних рухів у порівнянні з кастомним рігом, виявлення переваг та недоліків кожного підходу;
- розробка рекомендацій щодо оптимального технологічного процесу створення цифрового двійника, який дозволяє отримати модель AAA-якості з мінімальними витратами часу.

Об'єктом дослідження є процес створення реалістичних 3D-моделей людей для інтерактивних середовищ та медіа-контенту.

Предметом дослідження є методика використання фотограмметрії та інструментарію MetaHuman для автоматизованої генерації топології та рігу персонажа.

У ході виконання кваліфікаційної роботи планується розглянути повний цикл виробництва: від фотографування людини на 360° до фінального рендеру. Для того, щоб оцінити ефективність, буде реалізовано дві версії методу створення анімації. Після отримання результатів, створена модель буде протестована.

Аналіз результатів дозволить зрозуміти, як можна ефективно поєднати точність реальних даних та потужність процедурних інструментів для оптимального результату.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Умови до візуальної складової технічного завдання

Технічне завдання являє собою створення та анімація 3D-портрета людини для візуального супроводу концертного шоу артиста. Ключовим об'єктом розробки є анімований 3D-бюст, який поєднує в собі риси реальної людини та стилістику наукової фантастики. Ця робота має чітку художню та технічну спрямованість: забезпечення ефекту присутності цифрового двійника виконавця на сцені, який взаємодіє з аудиторією через візуальний ряд. Головним концептуальним прикладом став герой з популярної гри «Detroit: Become Human», де роботи мали людську зовнішність і жили серед людей, при цьому могли втілюватися в їх природний роботизований вигляд (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Головний концептуальний приклад

Головною умовою є досягнення портретної схожості між виглядом моделі та артистом. 3D-модель повинна точно повторювати анатомічні особливості обличчя самого артиста, щоб глядач впізнавав його образ. Водночас, концепція вимагає трансформації звичної зовнішності у формат

робота або кіборга. Це передбачає специфічну роботу з текстурами та шейдингом, де шкіра може замінюватися на метал, пластик або синтетичні матеріали, зберігаючи при цьому людську міміку.

Функціональне призначення моделі виходить за рамки статичного зображення. Згідно з технічним завданням, бюст має виконувати роль активного учасника шоу: проговорювати задані фрази та відігравати широкий спектр емоцій протягом усього концерту. Це ставить високі вимоги до топології моделі, оскільки вона буде піддаватися значним деформаціям під час анімації мовлення та міміки.

Середовищем використання готової моделі і анімації є великі світлодіодні екрани концертної зали, тож рендер має бути високої роздільної здатності, а деталізація текстур повинна виглядати якісно навіть при значному масштабуванні. Візуальний ряд має бути синхронізований зі звуком та загальною сценографією виступу.

Основним технічним висновком з цього завдання є необхідність комплексного підходу до створення персонажа. Оскільки модель повинна не просто виглядати як артист, а й рухатися як він. Важливим етапом являє собою рігінг, тобто створення скелета моделі та її керуючих елементів. Для реалізації мовлення та емоцій необхідно створити лицьовий ріг або систему блендшейпів, що дозволить точно відтворювати фонему для синхронізації губ зі звуком та міміки.

Результатом роботи стане повноцінна модель цифрова модель, що буде готова до анімації. Поєднання портретної точності, коректного рігу та пророблених текстур дозволить створити переконливий візуальний ефект, який стане емоційним якорем усього концертного шоу.

1.2 Специфіка та вимоги до створення 3D-моделі людини

Розробка 3D-моделі людини для використання в концертних шоу та сценічних виступах – це завдання, яке кардинально відрізняється від

створення персонажів для комп'ютерних ігор або навіть для кінематографа. Головним фактором, що диктує технічні вимоги до моделі, є середовище її демонстрації. На відміну від монітора гравця або екрана кінотеатру, концертний майданчик передбачає використання величезних LED-екранів, розміри яких можуть сягати десятків метрів. При такій масштабній проекції будь-який недолік топології, низька роздільна здатність текстур або неприродність анімації стають критично помітними глядачеві.

Основною проблемою, яку необхідно вирішити в рамках технічного завдання, є подолання ефекту «зловісної долини». Цей психологічний феномен виникає, коли цифровий об'єкт виглядає та рухається майже як справжня людина, але дрібні відхилення в міміці чи деталізації шкіри викликають у глядача відчуття дискомфорту та відторгнення. У контексті живого виступу, де емоційний зв'язок артиста з публікою є ключовим, така реакція є неприпустимою. Тому модель повинна мати фотореалістичну, стабільну лицьову анімацію, яка точно передає артикуляцію.

Ще одним важливим аспектом технічного завдання є робота зі світлом. Концертне освітлення є динамічним, контрастним і часто змінюється в реальному часі. Цифровий двійник повинен коректно реагувати на ці зміни, що висуває високі вимоги до матеріалів та системи рендерингу. Використання технологій трасування променів у середовищі Blender дозволяє досягти необхідного рівня інтеграції персонажа у світлове шоу, але це вимагає оптимізованої геометрії, щоб уникнути технічних збоїв під час відтворення.

Отже, постає завдання створити модель, яка поєднує в собі кінематографічну деталізацію та технічну оптимізацію для роботи в реальному часі або швидкого рендерингу. Традиційні методи ручного моделювання часто не дозволяють досягти портретної схожості та необхідного рівня реалізму в стислі терміни підготовки до шоу, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів до виробництва, заснованих на технологіях сканування та процедурної генерації.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ВІДПОВІДНО ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Основи 3D-графіки

3D графіка – це технологія, яка дозволяє зображенню та об'єкту мати три виміри: ширину, висоту та глибину. Це дійсно відрізняє її від 2D графіки, де елементи є плоскими. Використовуючи 3D графіку, ми можемо обертати об'єкт у просторі та маніпулювати ним, що призводить до більш реалістичного вигляду зображення. Усі ці кроки залежать від моделювання, текстурювання, освітлення, анімації, рендерингу та симуляції.

Моделювання фактично формує 3D конструкцію частини. Це можна зробити вручну в програмах з нуля або шляхом сканування реальних об'єктів,

3D-текстурювання. Поверхню видно завдяки текстурюванню. Текстури створюються для того, щоб модель набула кольору, візерунків і рельєфу та виглядала реально або стилізовано.

Освітлення. Існують віртуальні лампи та сонячне світло, щоб імітувати фактичну фізику світла: його інтенсивність, колір і те, як світло падає на речі.

Анімація вдихає в це життя. Це процес, через який вводиться рух: від відносно простого руху або зміни форми до більш складної механіки, такої як рухи людини на ногах.

Рендеринг – це місце, де відбувається остаточний процес оцінки, перетворюючи 3D модель на невідрізнюване зображення або відео. Тут все є поєднанням тіней, світла та речовини.

Симуляція потрібна щоб імітувати фізичні речі (воду, вогонь, тканину) у віртуальному просторі, щоб вивчати їх або просто зображати їх чудово.

Кожен з цих компонентів взаємопов'язаний. Сітка важлива для правильного створення (в топології під час моделювання), оскільки неправильна сітка, погані тіні під час текстурювання та артефакти під час анімації з'являться пізніше.

Сьогодні практично кожен використовує 3D технології, оскільки вони дозволяють створювати детальні, точні та реалістичні речі. У кіно та анімації 3D є важливим елементом – воно дозволяє створювати спецефекти та цілі фантастичні світи, які неможливо зняти з камери.

У сфері архітектури та дизайну фахівці створюють 3D візуалізації майбутніх будівель та інтер'єрів. Це дозволяє клієнтам заздалегідь побачити, як виглядатиме кінцевий продукт. Завдяки моделюванню інженери та промислові дизайнери розробляють нові продукти та тести. Це дозволяє виявляти та виправляти помилки на рівні комп'ютерної моделі, а не в період фактичного виробництва.

Медицина використовує 3D для моделювання органів, планування складних операцій та навчання лікарів.

3D графіка є основою для створення живих інтерактивних світів у іграх. VR та AR дозволяють користувачам взаємодіяти в реальному часі з цифровими об'єктами у реальному світі. Це цікаво і може бути корисним як для розваг, так і для серйозної практики.

В освіті 3D полегшує візуальне пояснення складних наукових явищ, які важко уявити в голові людини. Реклама варта згадки, і крім цього. Це велика частина простору 3D графіки, що полегшує створення яскравих і запам'ятовуваних матеріалів. Це набагато простіше і гнучкіше, ніж зйомка з одного боку, оскільки будь-яку деталь можна змінити в процесі без повторної зйомки. Це розвивається з часом, оскільки технології та тренди рухаються разом з ним, 3D графіка поширюється, щоб відкривати нові області; роблячи найрізноманітніші проекти у світі візуально цікавішими.

2.2 Аналіз літератури та актуальності створення 3D-моделі людини

Створення фотореалістичного цифрового двійника людини вважається одним із найскладніших завдань у сучасній комп'ютерній графіці. Як зазначає Кен Брілліант у своїй роботі «Building a Digital Human» [1],

реплікація людського тіла є найскладнішою подорожжю для цифрового художника, оскільки глядач інтуїтивно знає, як має виглядати людина, і миттєво помічає найменші неточності. Ця чутливість аудиторії створює високий бар'єр для входження в індустрію та вимагає від розробників пошуку нових, більш ефективних інструментів.

Основною проблемою, з якою стикаються 3D-художники при ручному моделюванні, є феномен зловісної долини. Анджела Тінвелл у книзі «The Uncanny Valley in Games and Animation» [2] наголошує, що глядачі відчують негативну реакцію та когнітивний дисонанс, коли персонаж виглядає майже як людина, але має ледь помітні дефекти у міміці або погляді. Для концертного шоу, де емоційний зв'язок артиста з публікою є критичним, потрапляння у зловісну долину неприпустиме. Традиційні методи анімації часто не здатні передати мікрорухи обличчя з достатньою точністю без використання надзвичайно дорогих систем захоплення руху.

Другою вагомою проблемою є ресурсна витратність традиційного пайплайну. Роб О'Ніл у праці «Digital Character Development: Theory and Practice» [3] детально описує виробничий процес, який включає анатомічне моделювання, побудову систем деформації м'язів та шкіри, а також складний рігінг обличчя. Цей процес вимагає залучення вузькопрофільних спеціалістів (скульпторів, ріггерів, грумерів) та значних часових витрат, що часто є неможливим для локальних студій або проєктів з обмеженим дедлайном.

Крім того, ручний скульптинг вимагає від художника глибоких знань пластичної анатомії. Скотт Спенсер у книзі «ZBrush Digital Sculpting Human Anatomy» [4] підкреслює, що без фундаментального розуміння структури скелета, м'язів та підшкірного жиру неможливо створити переконливого персонажа, навіть маючи потужні інструменти на кшталт ZBrush. Це створює додатковий ризик людського фактора, коли помилка художника в пропорціях призводить до втрати портретної схожості.

Отже, аналізуючи традиційний підхід до створення 3D-персонажів, можна зробити висновок, що сучасна індустрія стикається з трьома

критичними бар'єрами, які роблять процес створення цифрового двійника надзвичайно складним завданням.

По-перше, це психологічний бар'єр. Головна проблема полягає не в технологіях, а в людському сприйнятті. Глядач є експертом з розпізнавання людських облич на підсвідомому рівні. Як наслідок, будь-яка похибка в анімації очей чи скороченні м'язів викликає у аудиторії когнітивний дисонанс. Це робить ручне налаштування емоцій не просто складним, а критично небезпечним для проєктів, де є важливий емоційний контакт.

По-друге, ресурсний та часовий бар'єр. Класичний підхід до виробництва є занадто важким. Процес вимагає послідовності етапів: скульптинг, ретопологія, текстурування, рігінг, скінінг, грумінг. Кожен із цих етапів вимагає окремих вузькопрофільних спеціалістів. Для невеликих студій чи індивідуальних розробників це створює ситуацію, коли реалізація проєкту високої якості стає практично неможливою через брак часу та бюджету на команду професіоналів.

По-третє, кваліфікаційний бар'єр. Якість фінального продукту при ручному методі прямо залежить від фундаментальних знань анатомії конкретного художника. Недостатньо просто знати інструментарій, потрібно розуміти анатомію та структуру кісток. Це означає, що поріг входження в професію створення реалістичних персонажів є штучно завищеним, а ризик помилки через недосвідченість художника залишається стабільно високим.

2.3 Огляд існуючих методів створення 3D-портрету людини

Створення цифрового двійника конкретної людини – це завдання, яке не терпить компромісів у точності. В індустрії CGI сформувалися два полярні підходи до вирішення цієї задачі: повне ручне моделювання та використання даних 3D-сканування. Щоб обґрунтувати вибір методики для даної роботи, необхідно проаналізувати переваги та недоліки обох методів у контексті підготовки контенту для шоу.

Традиційний метод – це метод який базується на художній інтерпретації зовнішності людини. Процес починається з болванки і продовжується скульптингом у програмних 3D-пакетах. Художник вручну відтворює анатомічні особливості, пропорції обличчя, зморшки та пори шкіри, орієнтуючись на реальні фотографії людини. Далі слідує етап ручної створення правильної сітки для анімації, створення UV-розгортки та текстурування.

Головним недоліком цього підходу є суб'єктивний фактор. Навіть досвідчений 3D-художник може припуститися непомітних помилок у пропорціях, через це, модель втрачає портретну схожість з оригіналом. Крім того, цей шлях є надзвичайно важким. Створення фотореалістичного персонажа з нуля може займати місяці роботи цілої команди.

Метод фотограмметрії та 3D-сканування – є альтернативою ручній праці через використання об'єктивних даних. Фотограмметрія дозволяє отримати високоточну геометрію обличчя та тіла шляхом аналізу серії фотографій, зроблених з різних ракурсів. Програмне забезпечення генерує хмару точок, яка перетворюється на модель.

Перевага цього методу – це абсолютна геометрична точність. Таким чином, ми отримуємо не інтерпретацію зовнішності, а її фактичний вигляд. Час отримання базової моделі скорочується з тижнів до годин.

Але, сам скан має суттєвий недолік, а саме, хаотичну топологію, яка абсолютно непридатна для якісної анімації. Така модель не може правильно деформуватися під час міміки, оскільки сітка буде ламатися, створюючи артефакти. Отже, використання чистого скану неможливе без етапу глибокої переробки топології.

2.4 Аналіз програмних пакетів для створення 3D-людини

Для реалізації завдань, пов'язаних зі створенням цифрових персонажів, на ринку існує широкий спектр програмного забезпечення. Кожен пакет має свою спеціалізацію, унікальний функціонал та обмеження. Для розуміння

технічного контексту роботи необхідно проаналізувати основні інструменти, що використовуються в індустрії CGI.

Blender [5] – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом для 3D моделювання, анімації та рендерингу. Завдяки своїм потужним інструментам для створення високоякісних моделей, текстур, візуальних ефектів та анімацій, Blender є незамінним інструментом для художників та дизайнерів. Він підтримує розширення та налаштування через скрипти та додатки, щоб відповідати потребам користувача.

Character Creator 4 [6] – це автономний продукт, який використовується для створення 3D персонажів, анімацій та рендерингу. Character Creator 4 є таким популярним інструментом, оскільки пропонує потужні дизайнерські функції, які допомагають створювати високоякісні моделі, реалістичні текстури, налаштування ригінгу та анімацію обличчя, що робить його безцінним інструментом для художників та інших творців. Плагіни дозволяють розширювати та налаштовувати програму, а також інтегрувати її з іншими інструментами. Користувачі можуть змінювати програму, коли забажають.

Autodesk Maya [7] – це професійний програмний пакет, який використовується для 3D моделювання, анімації, симуляції та рендерингу. Maya надає потужні інструменти для створення високоякісних моделей, текстур, складних візуальних ефектів та анімацій, що робить її популярним вибором серед художників та дизайнерів. Скрипти (MEL, Python) та плагіни полегшують розширення програми для налаштування.

Unreal Engine 5 [8] – це ігровий рушій та платформа для створення 3D-контенту, що використовується для розробки ігор, віртуального виробництва та рендерингу в реальному часі. Unreal Engine 5 має потужні інструменти для створення високоякісних інтерактивних світів, фотореалістичної графіки, візуальних ефектів та анімацій. Він також підтримує різноманітні плагіни та розширення, використовуючи систему візуального скриптингу Blueprints, а також C++, що дозволяє користувачам налаштовувати рушій відповідно до їхніх потреб.

ZBrush [9] – це програмне забезпечення для цифрової скульптури, яке використовується для 3D-моделювання, текстурювання та рендерингу. Для найкращих високоякісних моделей з високою кількістю полігонів, текстур, деталізації поверхні та персонажів, ZBrush пропонує інструменти, які роблять його надзвичайно популярним серед художників і дизайнерів. Завдяки користувацьким пензлям, макросам і плагінам, програма адаптується і пропонує розширення, що відповідають потребам користувачів.

Daz Studio [10] – це безкоштовний додаток, що підходить для створення та рендерингу 3D-сцен і поз. Daz Studio пропонує потужні інструменти з існуючими моделями, модифікацією морфів, симуляцією фізики одягу та анімацією. Він широко використовується ілюстраторами та цифровими художниками. Програма підтримує розширення та налаштування через скрипти, плагіни та мости з іншими редакторами, дозволяючи користувачеві налаштовувати та маніпулювати нею на свій розсуд.

Табл. 1.1. була створена для аналізу кількох ключових факторів в аналізі порівнянь програмних пакетів що використовуються у створенні 3D-людини.

Таблиця 1.1 – Порівняння програмних пакетів, що використовуються у створенні 3D-людини

Програмне забезпечення	Blender	Character Creator 4	Unreal Engine 5	ZBrush	Daz Studio
Основне призначення	Універсальне 3D-моделювання, анімація та рендеринг	Швидка генерація та налаштування готових до анімації 3D-персонажів	Ігровий рушій, рендеринг у реальному часі, створення інтерактивних світів	Цифровий скульптинг високої деталізації	Позінг готових моделей, збирання сцен з асетів та рендеринг
Складність освоєння	Висока	Низька	Висока	Висока	Низька
Головні переваги	Універсальність : може робити все (моделінг, скульпт, відеомонтаж, 2D-анімація).	Швидкість: створення реалістичного персонажа з правильною сіткою та рігом за хвилини.	Графіка: фотореалізм у реальному часі (Lumen, Nanite) без довгого рендеру.	Деталізація: робота з мільйонами полігонів без гальм, органічні форми.	Бібліотека: величезний магазин готового одягу, волосся та поз для швидкого збирання.
Вартість	Безкоштовно	Платна	Безкоштовно	Платна	Безкоштовно

2.5 Аналіз додаткових програм для створення 3D-людини

Окрім базових пакетів для моделювання та анімації, сучасний виробничий процес вимагає використання спеціалізованого програмного забезпечення, яке деталізує та завершує візуальний образ. Ці допоміжні інструменти використовуються для вирішення конкретних завдань, таких як високоточна обробка даних сканування, генерація процедурних текстур шкіри або моделювання реалістичного одягу. Ці рішення повинні бути частиною загального процесу, необхідного для досягнення фотореалізму, і тому слід досліджувати програмні пакети, які використовуються для текстуровання, роботи з даними фотограмметрії та моделювання тканин.

Marvelous Designer [11] – це спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується для 3D-моделювання одягу, симуляції тканини та рендерингу. Marvelous Designer надає потужні інструменти для створення високоякісних викрійок, реалістичних драпірувань та деталізованих костюмів, що робить його популярним вибором серед художників персонажів та дизайнерів моди. Програма підтримує розширення та налаштування через імпорт аватарів та інтеграцію з іншими 3D-редакторами, що дозволяє користувачам адаптувати її під свої потреби.

Substance 3D Painter [12] – це спеціалізоване програмне забезпечення, яке використовується для 3D текстуровання, створення матеріалів та рендерингу. Substance Painter надає потужні інструменти для створення високоякісних PBR текстур, реалістичних поверхонь, візуальних ефектів зносу та деталізації, що робить його популярним вибором серед художників та дизайнерів. Програма підтримує розширення та налаштування через смарт-матеріали, генератори та плагіни, що дозволяє користувачам адаптувати її до своїх потреб.

Live Link Face [13] – це мобільний додаток, який захоплює вирази обличчя, записує анімацію обличчя та передає дані в Unreal Engine. Оскільки Live Link Face використовує технологію ARKit та синхронізацію з

таймкодом, ця функція ідеально підходить для аніматорів та інших розробників віртуального виробництва, які хочуть швидко та точно відстежувати рухи обличчя. Вони також можуть легко додавати розширення та налаштовувати його в межах мережевих налаштувань та параметрів калібрування, щоб адаптувати додаток відповідно до своїх вимог.

Polycam [14] – це мобільний додаток для 3D-сканування, який допомагає захоплювати зображення за допомогою фотограмметрії, захоплювати простори та створювати цифрові двійники. У Polycam також існує широкий вибір інструментів для обробки даних LiDAR і фотографій, що забезпечує потужну основу для створення реалістичних текстур з точними вимірами, що робить його дуже зручним для архітекторів, дизайнерів і 3D-художників. Завдяки широкому спектру форматів експорту та інтеграції з хмарою, додаток також підтримує розширення та налаштування.

Аналіз допоміжного програмного забезпечення свідчить про те, що досягнення високого рівня фотореалізму неможливе без використання вузькоспеціалізованих інструментів. Кожен із розглянутих продуктів – від мобільних додатків для сканування та захоплення міміки до потужних пакетів для симуляції тканин та текстурування – вирішує конкретні технологічні завдання значно ефективніше, ніж універсальні 3D-редактори. Інтеграція цього програмного стеку в єдиний пайплайн дозволяє не лише деталізувати візуальний образ цифрового двійника, а й суттєво автоматизувати рутинні процеси, забезпечуючи баланс між швидкістю виробництва та якістю фінального результату.

3 ФОРМУЛЮВАННЯ ГІПОТЕЗИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі аналізу проблем традиційного методу створення 3D-образів у кіно та ігровій індустрії сформульовано комплексну гіпотезу кваліфікаційної роботи. Вона базується на припущенні, що оптимізація виробничого процесу створення фотореалістичного персонажа AAA-рівня можлива шляхом впровадження гібридного пайплайну, який поєднує технології фотограмметрії, процедурну генерацію MetaHuman та диференційований підхід до анімації.

Ми припускаємо, що інтеграція інструменту MetaHuman в екосистемі Unreal Engine 5 дозволяє автоматизувати найбільш ресурсомісткі технічні етапи – ретопологію, риггінг та скіннінг, забезпечуючи перехід від парадигми ручного моделювання до процедурної обробки даних.

При цьому для досягнення високої якості анімації цифрового двійника необхідний розподіл інструментарію: для лицьової анімації найбільш ефективним є використання нативного інструменту Live Link Face, що дозволяє захоплювати мікроміміку в реальному часі без дороговартісного обладнання. Для складної пластики тіла, де стандартний Control Rig має обмеження, доцільно використовувати зовнішні інструменти (Blender та аддон PolyHammer [15]) для доступу до DNA-файлів та створення кастомного рігу.

Для перевірки цієї гіпотези необхідно провести порівняльний експеримент за участю фахівців рівня 3D Technical Artist, які виконують ідентичне технічне завдання двома методами: традиційним (ручне створення та анімація) та запропонованим гібридним. Порівняння результатів за критеріями часових витрат, якості сітки, гнучкості керування та реалістичності рухів дозволить підтвердити ефективність запропонованої методики та обґрунтувати доцільність виходу за межі стандартного методу.

4 ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

4.1 Організація дослідно-експериментальної роботи

У межах кваліфікаційної роботи було проведено експеримент з метою верифікації комплексної гіпотези щодо оптимізації виробничого процесу створення фотореалістичних персонажів AAA-рівня. Для того, щоб об'єктивно порівняти ефективність запропонованого гібридного пайплайну з традиційними методами ручного моделювання, було обрано метод експертних оцінок. Цей метод являє собою процес аналізу та аргументації результатів компетентними фахівцями, що є необхідним у випадках складності та новизни проблеми, коли повна математична формалізація якості 3D-образів та анімації є неможливою. Тож звертаємося до досвіду професіоналів індустрії, адже автоматизовані метрики не завжди здатні коректно оцінити художню та технічну складову персонажа.

Основний принцип застосованого методу експертних оцінок полягає в тому, що обрані експерти оцінюють об'єкти дослідження на основі чітко визначених критеріїв, що дозволяє звести суб'єктивні судження професіоналів до об'єктивного результату. Цей підхід є гнучким і ідеально підходить для аналізу пропозиції, яка поєднує технології фотограмметрії, процедурну генерацію та інструментарій MetaHuman.

Процес проведення експертної оцінки в рамках дослідження складається з кількох етапів: спочатку проводиться відбір експертів, які виконують ідентичне технічне завдання двома методами (традиційним та запропонованим гібридним), далі розробляються критерії оцінки, за якими аналізуватимуться результати, зокрема: часові витрати, якість сітки, гнучкість керування та реалістичність рухів. Експерти надають свої висновки щодо того, наскільки інтеграція MetaHuman в екосистему Unreal Engine 5 дозволяє автоматизувати ресурсні етапи ретопології, рігінгу та скіннінгу, а

також оцінюють ефективність розподілу інструментарію – використання Live Link Face для міміки та зовнішніх рішень типу Blender з аддоном PolyHammer для складної пластики тіла. Аналіз отриманих результатів допомагає зробити висновки щодо доцільності переходу від методу ручного моделювання до процедурної обробки даних.

Метод експертних оцінок є особливо корисним у нашому випадку, оскільки відсутня можливість формалізувати цільову функцію реалістичності або автоматично виміряти якість цифрового двійника. Порівняльний аналіз думок експертів дозволить підтвердити ефективність запропонованої методики та обґрунтувати доцільність виходу за межі стандартного методу створення анімації в кіно та ігровій індустрії.

Для проведення експерименту були представлені фотографії людини, зовнішність якої було потрібно відтворити (рис. 4.1), також, було представлено 2 варіанти втілення завдання: за традиційним методом (рис. 4.2) та запропонованим гібридним (рис. 4.3). Для експерименту було залучено 5 експертів у галузі 3D Technical Artist, які оцінювали надані моделі за допомогою визначених критеріїв.



Рисунок 4.1 – Зовнішність людини, яку потрібно відтворити у 3D-моделі

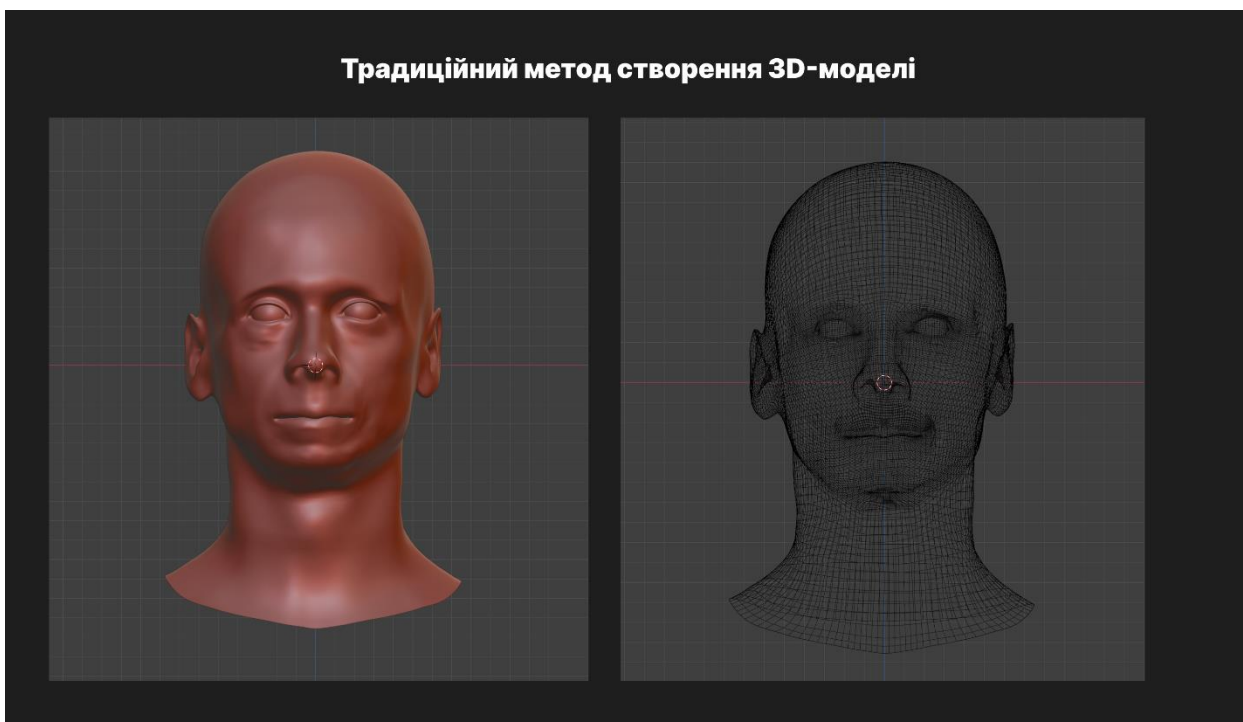


Рисунок 4.2 – Результат створення 3D-моделі за традиційним методом

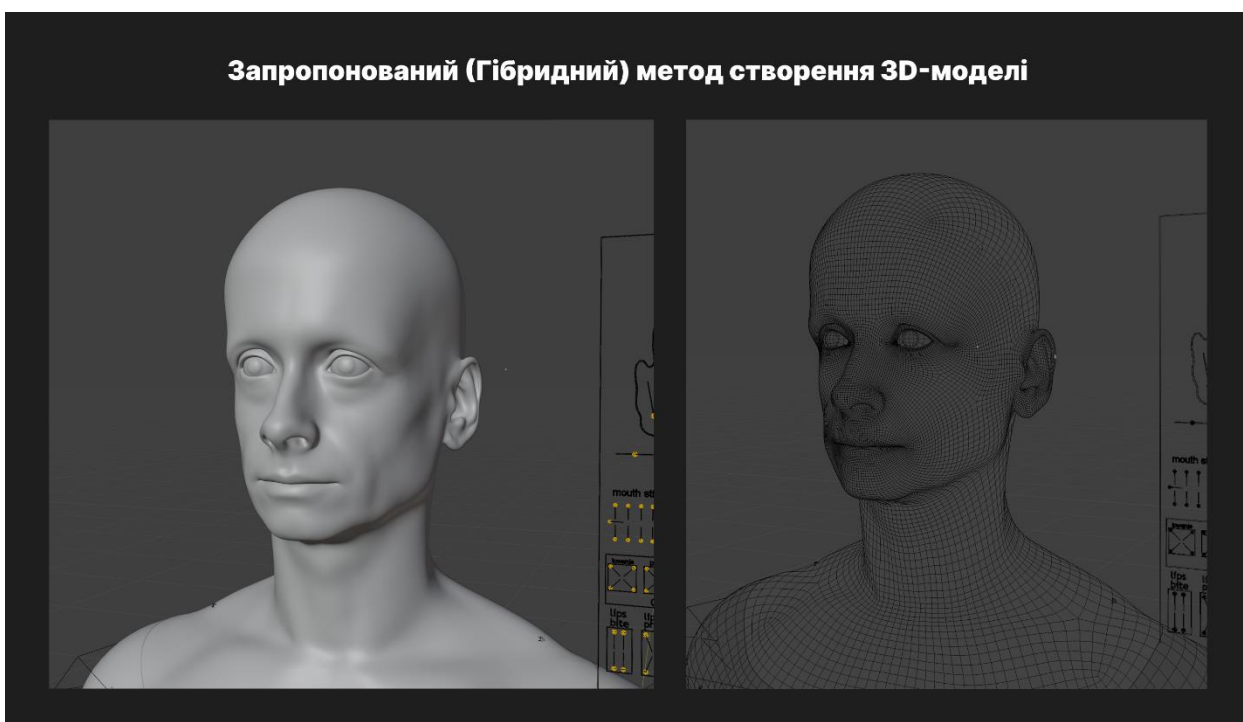


Рисунок 4.3 – Результат створення 3D-моделі за гібридним методом

4.2 Обробка результатів дослідно-експериментальної роботи

Для оцінки експертам була надана анкета з 5 критеріями: якість сітки (оцінка топології моделі), реалістичність рухів (анімація лиця), гнучкість управління моделі (можливість додавати або редагувати якісь елементи до моделі), якість UV-розгортки, оптимізація. Для визначення найбільш важливих критеріїв проведено анкетування експертів, результати наведені в таблиці 4.1, а також розраховано коефіцієнт узгодженості думок експертів.

Таблиця 4.1 – Критерії оцінки 3D-портрету

Критерій	Оцінка експерта					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
	Екс. 1	Екс. 2	Екс. 3	Екс. 4	Екс. 5				
Якість сітки	5	5	3	2	5	20	0,26	4,6	21,16
Реалістичність рухів	4	4	5	3	2	18	0,23	2,6	6,76
Гнучкість управління моделі	3	3	3	5	4	18	0,23	2,6	6,76
Якість UV-розгортки	1	2	2	1	1	7	0,09	8,4	70,56
Оптимізація	2	1	4	4	3	14	0,18	1,4	1,96
						$\Sigma = 77$	$\Sigma = 1,0$		

Вага кожного критерію визначається шляхом ділення його строкової суми на загальну суму всіх строкових сум. Для оцінки узгодженості ранжування значної кількості експертів (понад двох) обчислюється коефіцієнт конкордації W . Цей коефіцієнт є загальним показником рангової кореляції для групи, що складається з n експертів. Значення W варіюється від 0 до 1. Якщо коефіцієнт дорівнює одиниці, це свідчить про те, що всі експерти надали однакові ранги об'єктам. Чим менше значення W , тим менш узгодженими є оцінки експертів [16].

Коефіцієнт конкордації визначається за формулою:

$$W = \frac{12S}{n^2(m^3-m)}, \quad (4.1)$$

де W – коефіцієнт конкордації;

n – кількість експертів;

m – кількість критеріїв;

S – сума квадратів відхилень;

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 3,7}{5^2(2^3-2)} \approx 0,27.$$

Виходячи з отриманих результатів, можна стверджувати про узгодженість поглядів експертів. У наступному розділі наведено розрахунки, що порівнюють альтернативи за оцінками фахівців.

Критерій №1. Якість топології.

Для оцінки узгодженості думок експертів було проведено ранжування альтернатив. Варіанту з найбільшою сумою балів присвоювався ранг 1 (найкращий), варіанту з меншою сумою – ранг 2. Завдання експертам: оцініть технічну якість сітки 3D-моделей.

Результати оцінювання наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Оцінка технічної якості сітки

		Експерт					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
		1	2	3	4	5				
Якість сітки	1	2	2	2	1	1	8	0,53	0,5	0,25
	2	1	1	1	2	2	7	0,47	0,5	0,25
Середнє значення							7,5			

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 0,5}{5^2(2^3 - 2)} \approx 0,04.$$

Узгодженість експертів низька, але у гібридного методу є невелика перевага.

Критерій №2. Реалістичність рухів.

Завдання експертам: оцініть реалістичність рухів 3D-моделей.

Результати оцінювання наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Оцінка реалістичності рухів 3D-моделі

		Експерт					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
		1	2	3	4	5				
Якість	1	2	1	2	2	2	9	0,6	1,5	2,25
сітки	2	1	2	1	1	1	6	0,4	1,5	2,25
Середнє значення							7,5			

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 4,5}{5^2(2^3 - 2)} \approx 0,36.$$

Узгодженість експертів низька, але є помітна перевага першого варіанту.

Критерій №3. Гнучкість управління моделі.

Завдання експертам: оцініть гнучкість управління моделі 3D-моделі.

Результати оцінювання наведені в Таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Гнучкості і технічної складової 3D-моделі

		Експерт					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
		1	2	3	4	5				
Якість	1	1	2	1	1	2	7	0,47	0,5	0,25
сітки	2	2	1	2	2	1	8	0,53	0,5	0,25
Середнє значення							7,5			

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 0,5}{5^2(2^3 - 2)} \approx 0,04.$$

Критерій №3. Якість UV-розгортки.

Завдання експертам: оцініть дані UV-розгортки 3D-моделі. Результати оцінювання наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Оцінка технічної якості сітки

		Експерт					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
		1	2	3	4	5				
Якість сітки	1	1	1	1	2	2	7	0,47	0,5	0,25
	2	2	2	2	1	1	8	0,53	0,5	0,25
Середнє значення							7,5			

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 0,5}{5^2(2^3 - 2)} \approx 0,04.$$

Критерій №3. Оптимізація.

Завдання експертам: оцініть всі методи і фактичні дані оптимізації 3D-моделі. Результати оцінювання наведені в Таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Оцінка оптимізації 3D-моделі

		Експерт					Строкова сума	Вага	Відх. від ср. знач.	Квадр. відх. від ср. знач.
		1	2	3	4	5				
Якість сітки	1	2	2	2	2	2	10	0,67	2,5	6,25
	2	1	1	1	1	1	5	0,33	2,5	6,25
Середнє значення							7,5			

Коефіцієнт конкордації обчислено за (4.1):

$$W = \frac{12 \cdot 12,5}{5^2(2^3 - 2)} = 1.$$

Коефіцієнт $W = 1$. Це означає абсолютну узгодженість думок експертів (повну однотайність у тому, що другий варіант кращий за перший).

Виходячи з отриманих даних, можна стверджувати про єдність думок експертів. Для цього були підраховані узагальнені рейтинги, що дозволило зробити висновки та вибрати найкращу з наданих альтернатив:

$$Q_1 = (0,26 \cdot 0,53) + (0,23 \cdot 0,60) + (0,23 \cdot 0,47) + (0,09 \cdot 0,47) + \\ + (0,18 \cdot 0,67) \approx 0,55,$$

$$Q_2 = (0,26 \cdot 0,47) + (0,23 \cdot 0,40) + (0,23 \cdot 0,53) + (0,09 \cdot 0,53) + \\ + (0,18 \cdot 0,33) \approx 0,44.$$

У межах дослідження було проведено порівняльний експеримент між традиційним методом ручного моделювання та запропонованим гібридним пайплайном. Для об'єктивної перевірки гіпотези було застосовано метод експертних оцінок із залученням 5 фахівців галузі 3D Technical Artists.

За результатами обробки даних можна зробити наступні висновки:

Експерти визначили, що найвагомішими критеріями для оцінки 3D-персонажа є якість сітки (топология), реалістичність анімації обличчя та гнучкість управління моделлю. Меншу вагу отримали UV-розгортка та оптимізація, хоча вони також враховувалися.

Розрахунок коефіцієнта конкордації підтвердив, що думки експертів є узгодженими, що свідчить про достовірність отриманих результатів.

Порівняльний аналіз показав перевагу запропонованого гібридного методу над традиційним. Найвищий рівень однотайності експертів ($W=1$) було зафіксовано в критерії «оптимізація», де нова методика беззаперечно перевершила ручне моделювання.

Отже, експериментально підтверджено, що впровадження гібридного пайплайну є доцільним. Він дозволяє автоматизувати трудомісткі процеси (ріггінг, скіннінг, ретопологію) та забезпечує високу якість персонажів AAA-рівня, значно оптимізуючи виробничий час.

4.3 Висновки дослідно-експериментальної роботи

Після проведення експерименту можна зробити висновок про актуальність застосування гібридного пайплайна для створення 3D-людини. Традиційний метод значно ресурсомісткіший, ніж гібридний. Традиційний метод вимагає більше часу, знань і матеріальних ресурсів для його розробки. Традиційний метод є стандартом індустрії, коли великі компанії можуть дозволити собі витратити колосальні гроші на створення їх 3D-персонажів. Метод все так само залишається правильним, виконавці мають контроль над кожним полігоном в сітці, над кожною рисою обличчя, і цей спосіб все так само буде використовуватися у величезних проектах, особливо таких як: створення AAA-ігор, створення мультфільмів тощо.

Гібридний метод – це метод, де ресурси у вигляді грошей і часу мають занадто високу цінність. Сам процес створення займає набагато менше часу. Контроль над кожним елементом зовнішнього вигляду падає, безумовно, і сам гібридний метод має свої недоліки. Але доводиться ставити пріоритети між ціною та якістю кінцевим продуктом і для більшої частини ринку гібридний метод зможе допомогти в реалізації колись недоступних їм ідей.

Дослідно-експериментальна робота показує різницю в узгодженості на користь гібридного методу створення 3D-людини. Фактичний витрачений час гібридного методу (19 днів) явно випереджає традиційний метод (35 днів), що є головним аргументом щодо актуальності цього методу.

Окрім часових показників, вагомим доказом ефективності є порівняння розрахованих узагальнених рейтингів якості. Показник гібридного методу перевищує показник традиційного підходу. Це пояснюється тим, що хоча

традиційне ручне моделювання дає художнику повний контроль над топологією, і це було відзначено експертами у критерії «Якість сітки», гібридний метод беззаперечно виграє у критеріях «Оптимізація» та «Гнучкість управління», де коефіцієнт узгодженості думок експертів досяг максимуму.

Експеримент підтвердив, що автоматизація складних технічних етапів (ріггінг, скіннінг) за допомогою інструментарію MetaHuman не призводить до критичної втрати візуальної якості, необхідної для сценічного шоу. Навпаки, використання технології Live Link Face дозволило досягти стабільної лицьової анімації без артефактів, які часто виникають при ручному налаштуванні кісток новачком.

Таким чином, результати дослідження повністю підтверджують сформульовану гіпотезу: поєднання технологій фотограмметрії та процедурної генерації дозволяє створювати конкурентоспроможний продукт AAA-рівня. Гібридний пайплайн забезпечує скорочення виробничого циклу майже на 45%, що робить його оптимальним вибором для виконання технічного завдання в умовах обмежених ресурсів.

4.4 Впровадження гібридного методу в робочий процес

У процесі дослідження було проведено експеримент, у якому порівнювалися традиційний та гібридний методи створення 3D-портрета людини. Результати експертного оцінювання та аналіз часових витрат показали, що гібридний метод дозволяє скоротити час виробництва майже вдвічі (з 35 до 19 днів) при збереженні високої якості топології та анімації.

В ході роботи було розроблено поетапний план, який пропонує рекомендації для впровадження гібридного методу на кожному етапі розробки реалістичного персонажа. Розроблений гібридний пайплайн складається з 7 послідовних етапів, що поєднують автоматизацію MetaHuman із використанням спеціалізованого програмного забезпечення (Blender,

Substance 3D Painter, Marvelous Designer) для кастомізації. Процес виконання технічного завдання представлений наступною схемою (рис. 4.4).

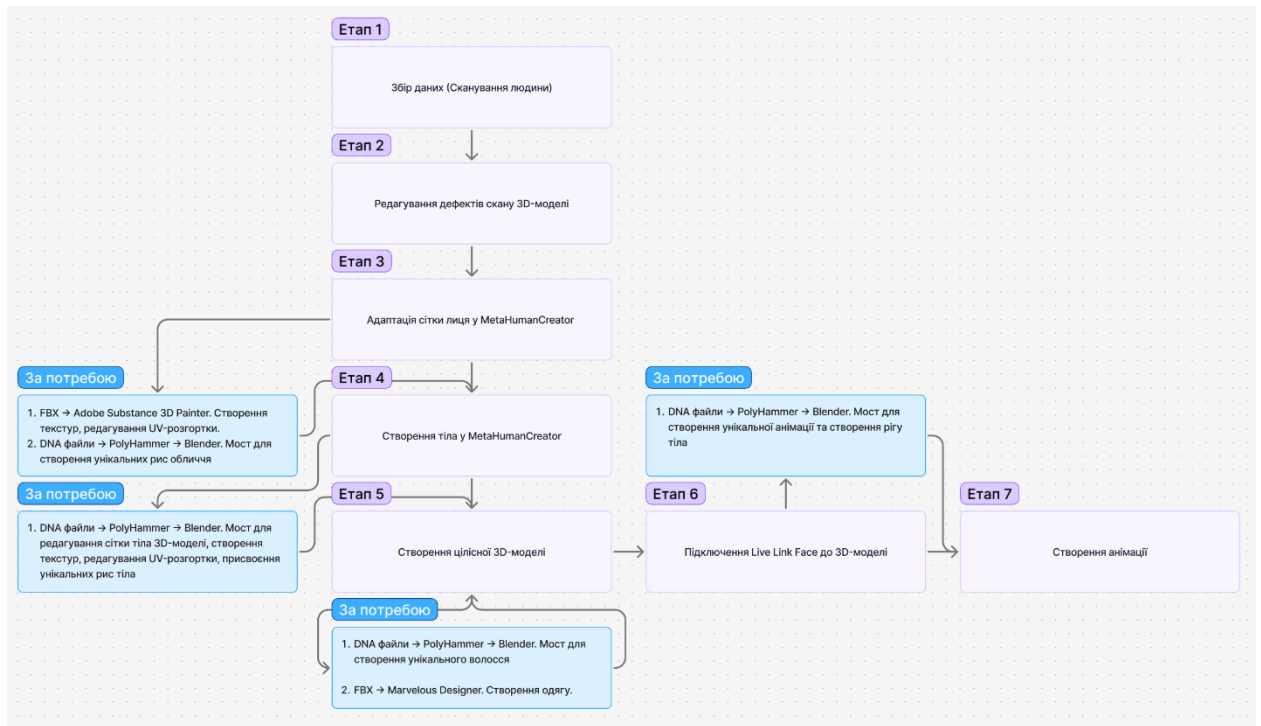


Рисунок 4.4 – Графічне представлення схеми впровадження гібридного методу робочого процесу

Перший етап – це збір даних (сканування людини). Початковий етап передбачає отримання цифрових даних про зовнішність об'єкта. Використовується метод фотограмметрії або 3D-сканування для створення хмари точок та базової геометрії.

Другим етапом є редагування дефектів скану 3D-моделі. Отриманий сирий скан очищується від артефактів, шумів та закриваються дірки в геометрії для забезпечення коректної роботи алгоритмів розпізнавання на наступних кроках.

Третій етап – адаптація сітки лиця у MetaHuman Creator. Використання функції Mesh to MetaHuman для автоматичної підгонки топології під скан. Після цього етапу можливий експорт моделі у форматі FBX до Adobe Substance 3D Painter для створення деталізованих текстур шкіри та

редагування UV-розгортки. Та використання PolyHammer та Blender для роботи з DNA-файлами, що дозволяє присвоїти унікальні риси обличчя у систему часток.

Четвертий етап – це створення тіла у MetaHuman Creator. Генерація тіла персонажа на основі бібліотеки пресетів. На цьому етапі, за потребою, використовується мост PolyHammer та Blender для редагування сітки тіла, створення унікальних текстур, налаштування UV-розгортки та зміни пропорцій тіла під конкретні вимоги.

Далі, етап створення цілісної 3D-моделі. Етап об'єднання налаштованої голови та тіла в єдиний асет. За потребою, саме з цього етапу використовується мост PolyHammer та Blender для створення унікального волосся (Grooming). Або експорт моделі у FBX та Marvelous Designer для симуляції та створення реалістичного одягу.

Шостий етап – це етап підключення Live Link Face до 3D-моделі. Налаштування з'єднання з мобільним додатком Live Link Face для захоплення міміки в реальному часі.

Сьомий етап – це етап створення анімації. Фінальний етап запису рухів та рендерингу. Саме на цьому етапі використовують мост PolyHammer та Blender для створення кастомного рігу тіла та унікальних анімацій, які неможливо реалізувати стандартними засобами Unreal Engine, та об'єднують усі потрібні анімації у програмних пакетах таких як Unreal Engine або Blender.

Увесь поетапний план спрямований на інтеграцію сучасних процедурних інструментів у процес створення цифрових людей, що дозволяє 3D-художнику зосередитися на творчих та художніх аспектах роботи, довіривши технічну рутину алгоритмам штучного інтелекту та процедурної генерації.

5 ОПИС ПРОЦЕСУ ПРАКТИЧНОЇ ЧАСТИНИ

5.1 Збір даних зовнішності людини та створення первинної геометрії

Робота над створенням цифрового двійника почалася з отримання вихідних даних. Оскільки стоїть завдання досягти максимальної портретної схожості з конкретною людиною, використання готових стокових моделей відразу відпадало. Потрібна була точна геометрична копія, тому використовується метод фотограмметрії [17].

Головним викликом цього методу є світло. Якщо знімати просто на вулиці або в звичайній кімнаті, на обличчі неминуче з'являться тіні від носа чи брів, які потім стануть текстурою і зіпсують вигляд моделі у рушії. Щоб уникнути цього і отримати максимально чисту текстуру, була орендована професійна фотостудія. Використовувалась схема з м'яким розсіяним світлом, розставивши софтбокси так, щоб освітити обличчя рівномірно з усіх боків і прибрати будь-які різкі тіні.

Сам процес зйомки вимагав від артиста повної нерухомості, тому він сидів на обертовому стільці в центрі студії. Для сканування був обран нейтральний вираз обличчя з розслабленими м'язами – це критично важливо, адже якщо засканувати людину з посмішкою, потім буде вкрай важко анімувати її в нейтральний стан чи смуток. Також було прибрано волосся назад, щоб відкрити вуха та лінію чола (рис. 5.1), оскільки волосся краще створювати окремо вже в 3D-редакторі.

Була виконана серійна зйомка, рухаючись навколо людини на 360°. Щоб алгоритм зміг коректно зшити фотографії в 3D-об'єкт, робились знімки з перекриттям кадрів не менше 60%, знімаючи з трьох різних рівнів: на рівні очей, трохи вище та знизу, щоб захопити складні ділянки підборіддя та носа. Отриманий масив фотографій було завантажено у Polycam, який згенерував первинну високополігональну модель. Результат вийшов сирым і з

хаотичною сіткою, але він дає головне – ідеально точні пропорції та фотореалістичну базу для подальшої роботи.



Рисунок 5.1 – Процес сканування

5.2 Редагування дефектів скану 3D-моделі

Polycam зробив досить непогану геометрію, але назвати її готовою моделлю було ще зарано. Це типовий скан: з шумом на поверхні шкіри, рваними краями та дірками в тих місцях, куди камері було важко зазирнути – наприклад, за вухами чи на маківці. А для того, щоб MetaHuman міг коректно розпізнати обличчя, йому потрібна чиста і, головне, цілісна сітка без розривів.

Тому модель була експортована в Blender, щоб довести сітку до ладу вручну. Перше, що кидається в очі – це дрібні нерівності на шкірі, які з'явилися через мікрорухи під час зйомки. Цей етап не потрібно сильно ускладнювати і можливо просто пройтися по проблемних зонах інструментами скульптингу, здебільшого пензлем Smooth, щоб вирівняти поверхню, але намагатися не замилити важливі риси обличчя [18].

Скан вийшов не ідеальним у зоні вух і ніздрів, оскільки геометрія була пошкоджена або взагалі відсутня (рис. 5.2). У ПЗ Blender було вручну закрито ці отвори, фактично дороблювалися відсутні полігони, щоб зробити модель герметичною. Також довелося прибрати зайве «сміття» – шматки коміра одягу та випадкові полігони, що зависли в повітрі. Особливою проблемою була сама структура сітки. Після фотограмметрії модель складалася з мільйонів хаотичних трикутників, що були незручними для роботи. Щоб привести це до ладу, було використано плагін Quad Remesher [19]. Він автоматично перерахував геометрію і перетворив трикутники на охайні, рівні полігони.

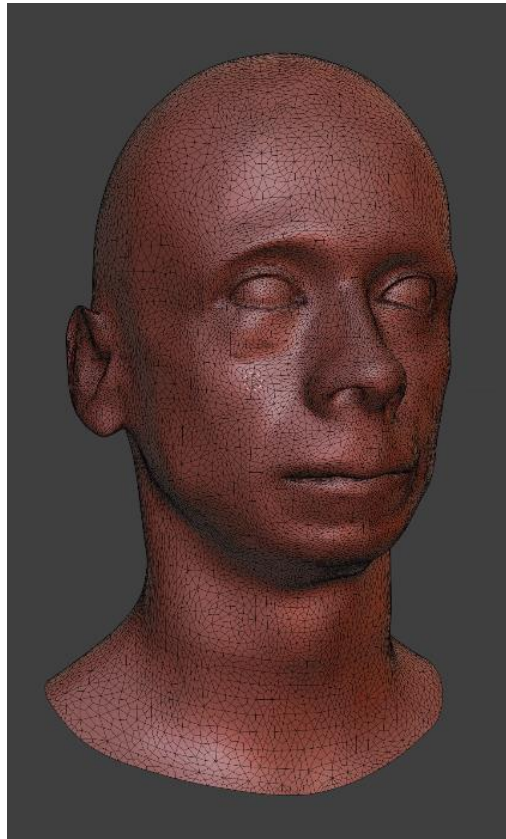


Рисунок 5.2 – Отримана 3D-модель після сканування

Наостанок було виставлено правильний масштаб і орієнтацію моделі в просторі, щоб в Unreal Engine вона не лежала на боці або не була розміром з хмарочос. Після цієї чистки було отримано охайну високополігональну болванку (рис. 5.3).

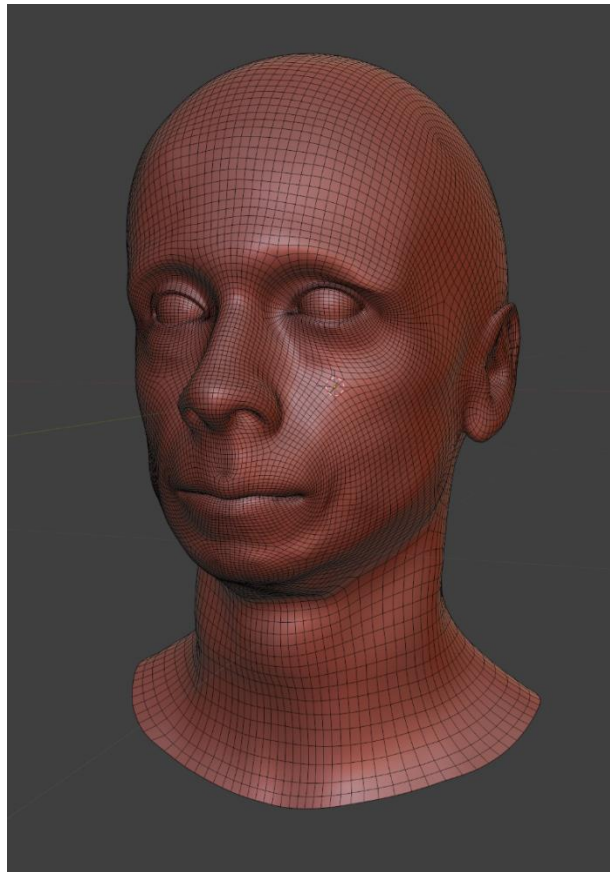


Рисунок 5.3 – Очищена модель від дефектів і трикутників

5.3 Інтеграція моделі у середовище Unreal Engine 5

Процес інтеграції підготовленої геометрії в екосистему розпочався безпосередньо в редакторі Unreal Engine 5. Для цього в браузері контенту було створено спеціальний асет «MetaHuman Identity», який виступає основним контейнером для обробки даних зовнішності. Очищена на попередніх етапах модель у форматі FBX була імпортована в проект та призначена у слот «Reference Mesh». Важливим технічним нюансом на цьому етапі є правильне позиціонування камери: для коректної роботи алгоритмів комп'ютерного зору віртуальний об'єктив було виставлено строго фронтально відносно обличчя, після чого поточний кадр зафіксували за допомогою функції «Promote Frame», створивши таким чином опорне зображення для аналізу.

На зафіксованому кадрі було активовано інструмент автоматичного трекінгу. Система спробувала самостійно розпізнати та окреслити ключові анатомічні риси, такі як контур губ, розріз очей, лінію брів та носа. Однак, оскільки робота велася зі сканованими даними, які можуть мати специфічні нерівності, автоматичний результат потребував ручної корекції. Маркери довелося правити вручну, приділяючи особливу увагу куточкам очей та лінії змикання губ, адже від точності позиціонування цих точок критично залежить якість майбутньої анімації мовлення та кліпання (рис. 5.4).

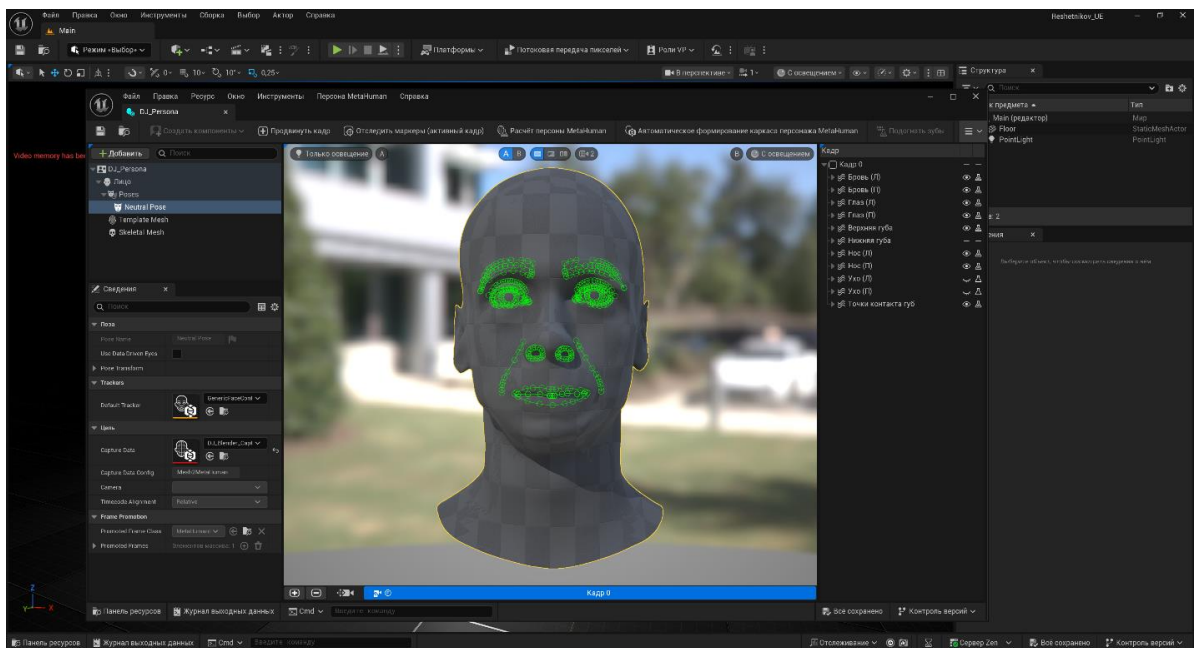


Рисунок 5.4 – Розміщення маркерів на 3D-моделі

Після затвердження позицій маркерів було запущено процес «Identity Solve». На цьому етапі алгоритми рушія проаналізували просторове положення маркерів та форму скану, щоб деформувати стандартний топологічний шаблон MetaHuman під індивідуальні пропорції людини. Результат перевірявся візуально шляхом накладання згенерованої сітки на оригінальний скан для виявлення можливих відхилень об'єму.

Фінальним кроком у цьому модулі стало обрання пресету тілобудови, найбільш наближеного до реального прототипу, та виконання команди «Mesh to MetaHuman».

Ця операція ініціювала відправку даних на сервери, де на основі отриманої топології було згенеровано унікальний файл DNA та повноцінний асет персонажа (рис. 5.5), доступний для подальшого редагування в хмарному інтерфейсі MetaHuman Creator [20].

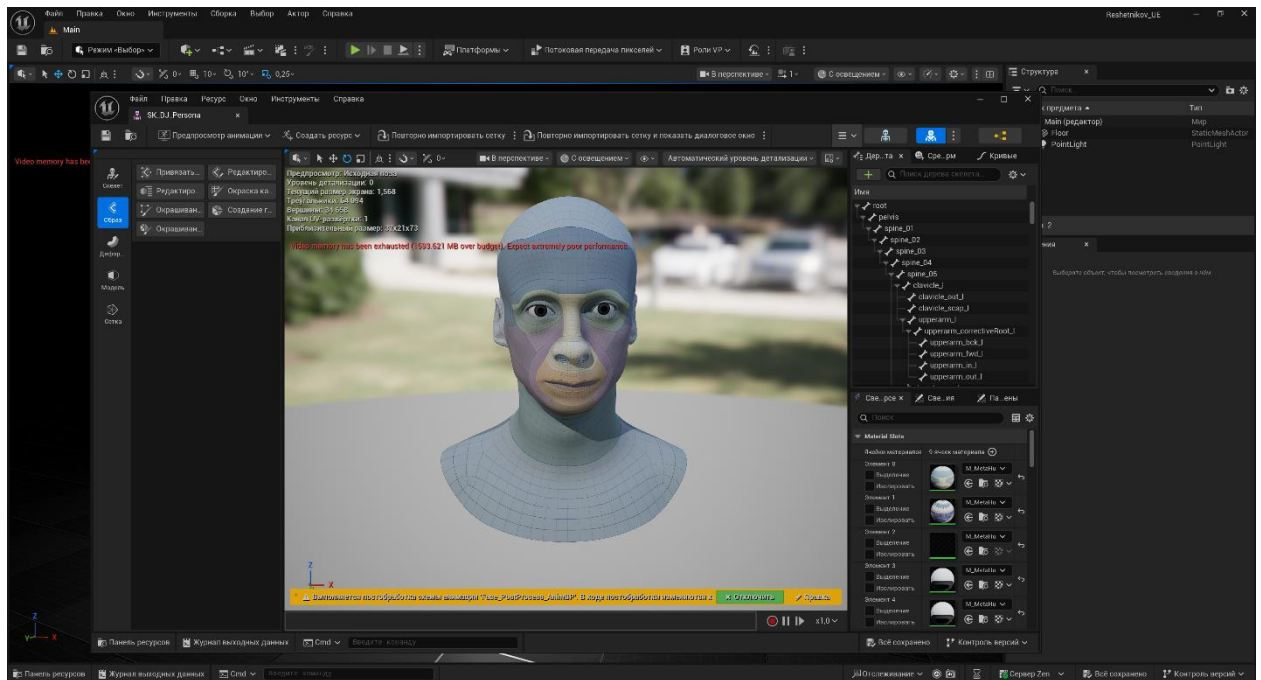


Рисунок 5.5 – Унікальний файл DNA

5.4 Редагування зовнішності та створення тіла у MetaHuman Creator

MetaHuman Creator функціонує як хмарне середовище на базі Unreal Engine, що дозволяє генерувати фотореалістичних цифрових людей шляхом процедурного моделювання. Його ключова роль у розробленому пайплайні полягає в автоматизації найбільш технічно складних процесів, таких як побудова кісткової системи та налаштування вагових коефіцієнтів, які в традиційному підході вимагають значних часових витрат. Інтерфейс програми пропонує специфічний набір інструментів для роботи з геометрією, який суттєво відрізняється від класичного полігонального моделювання [21]. Замість прямих маніпуляцій з вершинами, тут застосовуються методи змішування, що дозволяють комбінувати риси обличчя з бібліотеки інших

моделей, а також інструменти скульптингу та переміщення для точкового корегування анатомічних зон, таких як розріз очей, форма губ, підборіддя чи надбровних дуг (рис. 5.6).

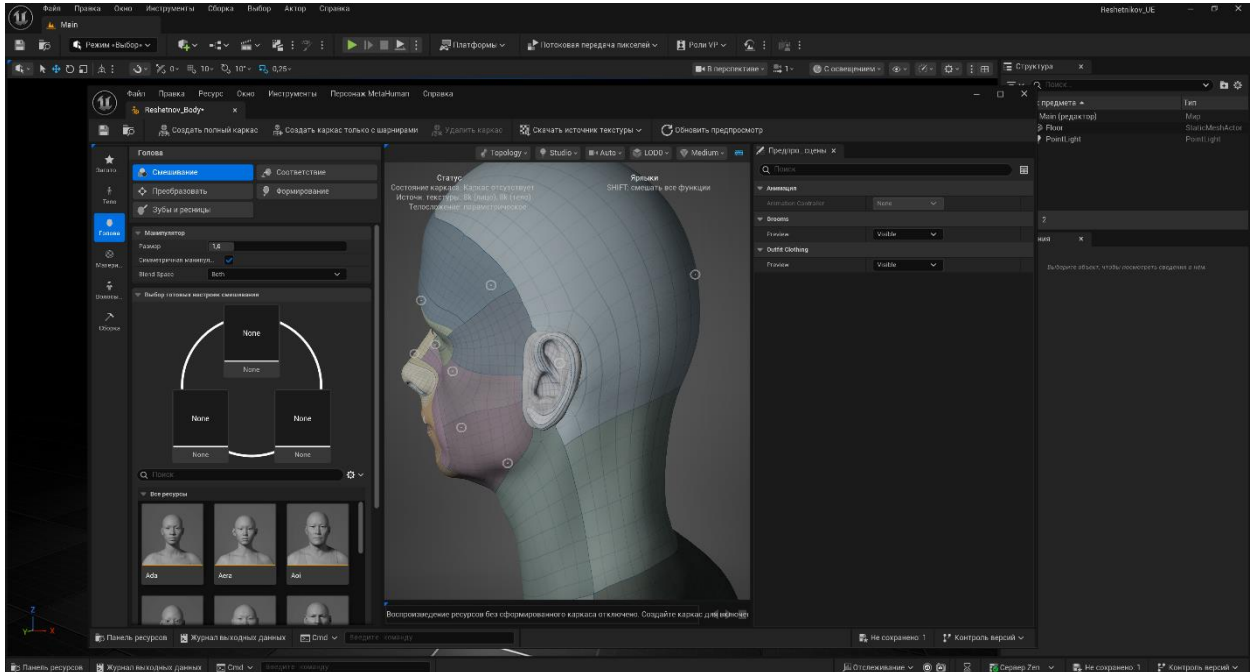


Рисунок 5.6 – Інструменти MetaHuman Creator

Окремої уваги заслуговує система налаштування матеріалів та текстур, яка забезпечує високий рівень фотореалізму. Інструментарій надає доступ до глибокого редагування параметрів шкіри, дозволяючи обирати не лише тон, а й структуру пор, вікові зміни, ступінь пігментації, наявність ластовиння та капілярної сітки. Реалістичність погляду досягається завдяки детальним налаштуванням очей, де користувач може змінювати структуру райдужної оболонки, вологість склери та параметри зіниці, а також редактору зубного ряду. Для роботи з волоссяним покривом використовується система на базі стрендів, яка забезпечує фізично коректну візуалізацію зачіски, брів, вій та рослинності на обличчі, хоча вибір стилів обмежується фіксованою бібліотекою пресетів (рис. 5.7).

Щодо налаштувань тіла, інструментарій MetaHuman Creator є більш стандартизованим і пропонує вибір із обмеженого набору пресетів, що

варіюються за зростом, статурою та гендерними ознаками. Також доступний базовий набір одягу для попереднього перегляду симуляції тканини. Саме обмеженість стандартних засобів кастомізації фігури та одягу в МНС стала передумовою для інтеграції в робочий процес зовнішніх інструментів, таких як Blender та Marvelous Designer, задля досягнення унікальних характеристик персонажа.

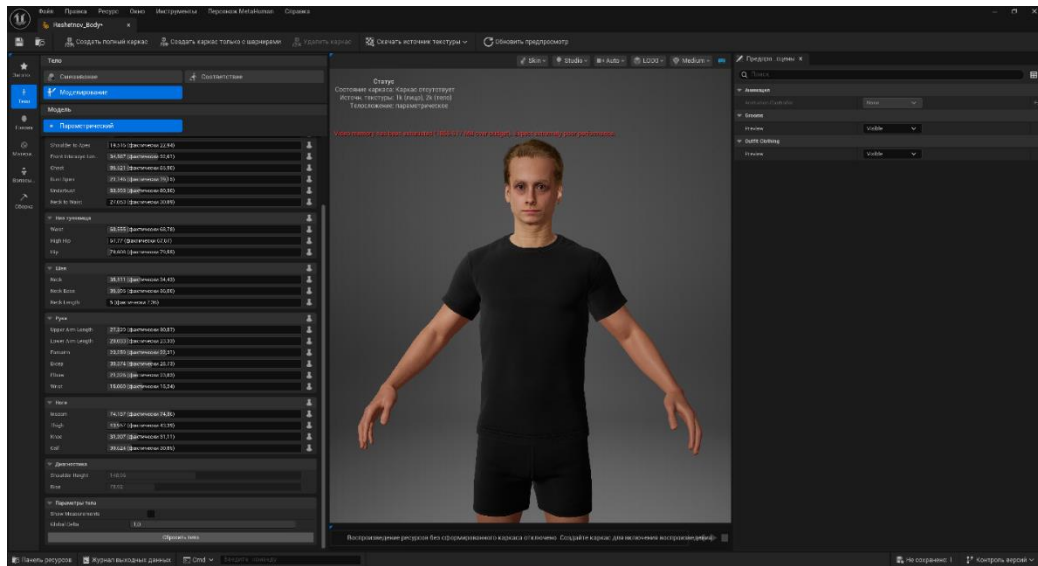


Рисунок 5.7 – Створена 3D-модель у MetaHuman Creator

5.5 Створення цілісної 3D-моделі

Фінальна збірка персонажа вимагала правильної організації даних для забезпечення як можливості редагування, так і максимальної візуальної якості. Для реалізації гібридного пайплайну було використано два різні типи експорту асетів з екосистеми MetaHuman, кожен з яких виконував свою технічну функцію.

Перший тип – Source Asset (DCC). Цей варіант експорту використовувався для отримання вихідної геометрії, необхідної для роботи з інструментарієм PolyHammer. Формат DCC надає доступ до некомпільованої сітки та скелетної структури, що дозволило експортувати модель у Blender, внести зміни в топологію тіла та форму голови, а потім

коректно повернути ці зміни назад у рушій без втрати прив'язки до скіннінгу (рис. 5.8).

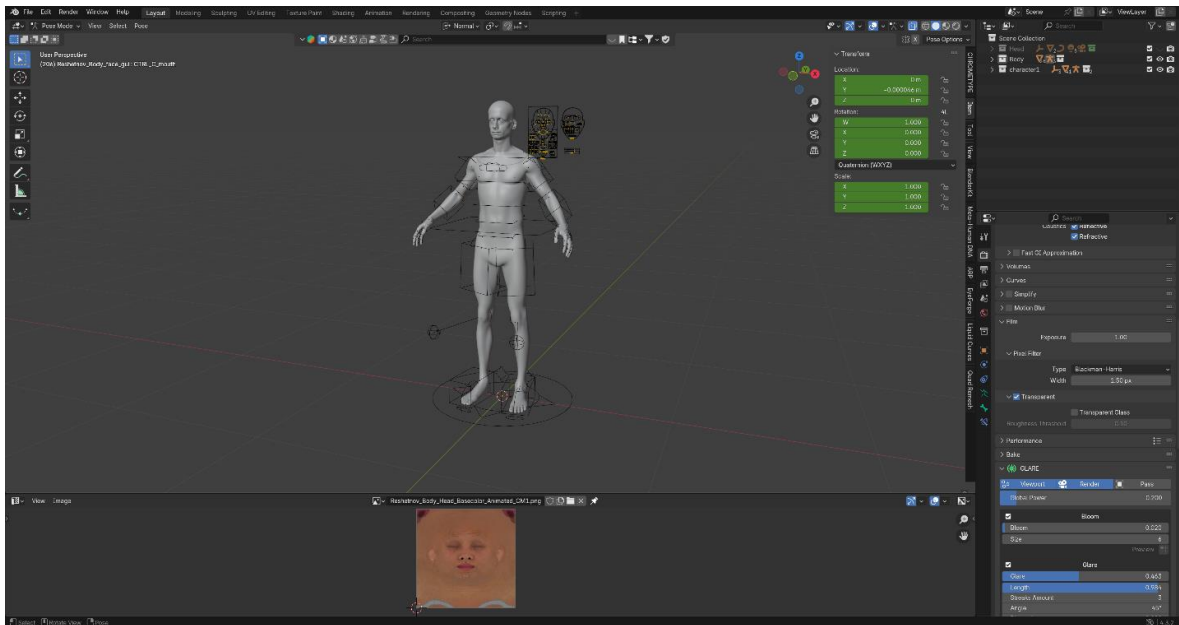


Рисунок 5.8 – Результат DCC експорту 3D-моделі у ПЗ Blender

Другий тип – UE Cine. Це фінальний варіант експорту безпосередньо в проект Unreal Engine 5. Він налаштований на максимальну якість відображення (LOD 0) з використанням текстур високої роздільної здатності (8K). Саме цей тип асета став основою для фінального результату (рис. 5.9).

Наступним важливим кроком стало налаштування волосся. Оскільки волосся у MetaHuman базується на технології «Strand-based Hair», для коректного відображення зачіски, брів та вії було створено та налаштовано відповідні прив'язки. Це забезпечило правильне прилягання волосся до кастомізованої форми голови. Для надання динаміки під час рухів було активовано фізичну симуляцію волосся через систему Niagara, що дозволило волоссям реагувати на гравітацію та інерцію голови артиста.

У результаті всіх маніпуляцій було сформовано фінальний об'єкт – MetaHuman Blueprint Actor. Його структура є модульною і складається з компонентів тіла, обличчя та елементів гримінгу, які ієрархічно підпорядковані один одному.



Рисунок 5.9 – Результат UE Cine експорту 3D-моделі

Головною перевагою отриманого актора є повна готовність до анімації:

- скелет;
- Control Rig;
- Facial Rig.

Таким чином, отриманий цифровий двійник є повністю оптимізованим, технічно справним актором, готовим до інтеграції.

5.6 Підключення та налаштування системи лицьової анімації

Для оживлення створеного цифрового двійника та реалізації завдань технічного завдання щодо відтворення мовлення та емоцій було обрано

метод захоплення міміки в реальному часі. Основним інструментом для цього виступив мобільний додаток Live Link Face (рис. 5.10), який використовує технологію «TrueDepth» [22] камери для зчитування топології обличчя актора та передачі даних у середовище Unreal Engine 5.

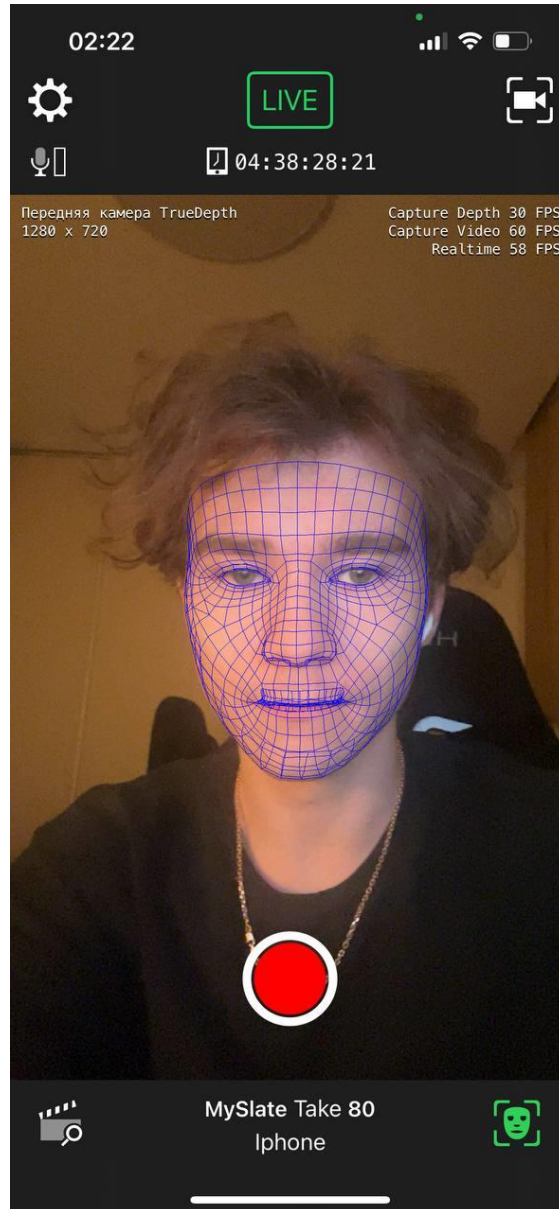


Рисунок 5.10 – Мобільний додаток Live Link Face

Процес інтеграції розпочався з налаштування мережевого з'єднання. Для забезпечення стабільної передачі пакетів даних смартфон та робоча станція були підключені до однієї локальної мережі. У налаштуваннях додатка було прописано IP-адресу комп'ютера як цільового отримувача, а в

самому рушії активовано плагіни Live Link та Apple ARKit. Це дозволило встановити UDP-з'єднання, через яке потік даних про рух 52 м'язів обличчя (ARKit Blendshapes) транслиювався безпосередньо на віртуального персонажа.

Критично важливим етапом стала процедура калібрування (рис. 5.12). Оскільки анатомія обличчя реального артиста та цифрової моделі може мати мікроскопічні відмінності, сирий сигнал з камери міг призводити до некоректного відображення нейтрального виразу. Для усунення цього у додатку було виконано калібрування нейтральної пози, що дозволило встановити нульові значення для всіх блендшейпів. Після цього у компоненті обличчя MetaHuman було обрано відповідний пристрій Live Link як джерело анімації, що забезпечило миттєву синхронізацію міміки актора та 3D-моделі в реальному часі.

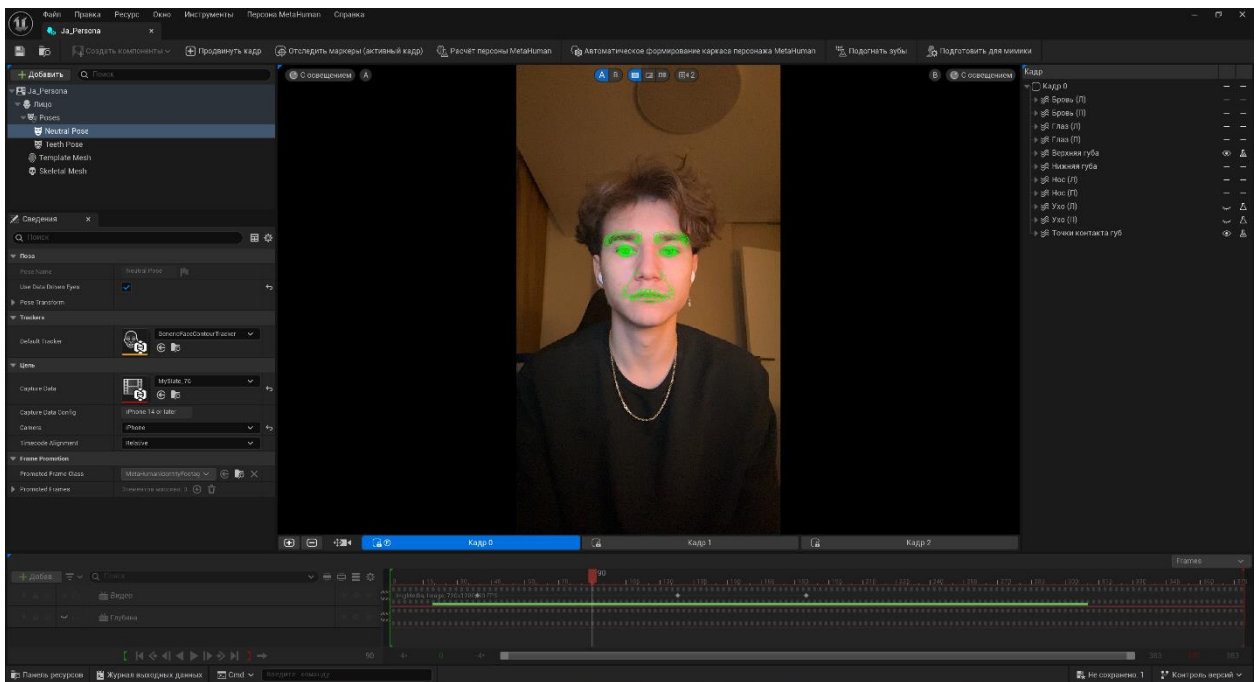


Рисунок 5.11 – Процес калібрування

Останнім кроком стала обробка записаного матеріалу через модуль MetaHuman Animator. Як показано на робочому екрані (рис. 5.12), цей інструмент дозволив провести точну синхронізацію відеореференсу з 3D-моделлю. Алгоритм проаналізував міміку актора на відео та покадрово переніс

її на контрольний ріг 3D-моделі, враховуючи всі рухи, артикуляцію та емоційні нюанси [23]. Отримана анімаційна послідовність була збережена як окремий асет і застосована до створеного раніше фінального актора 3D-моделі.

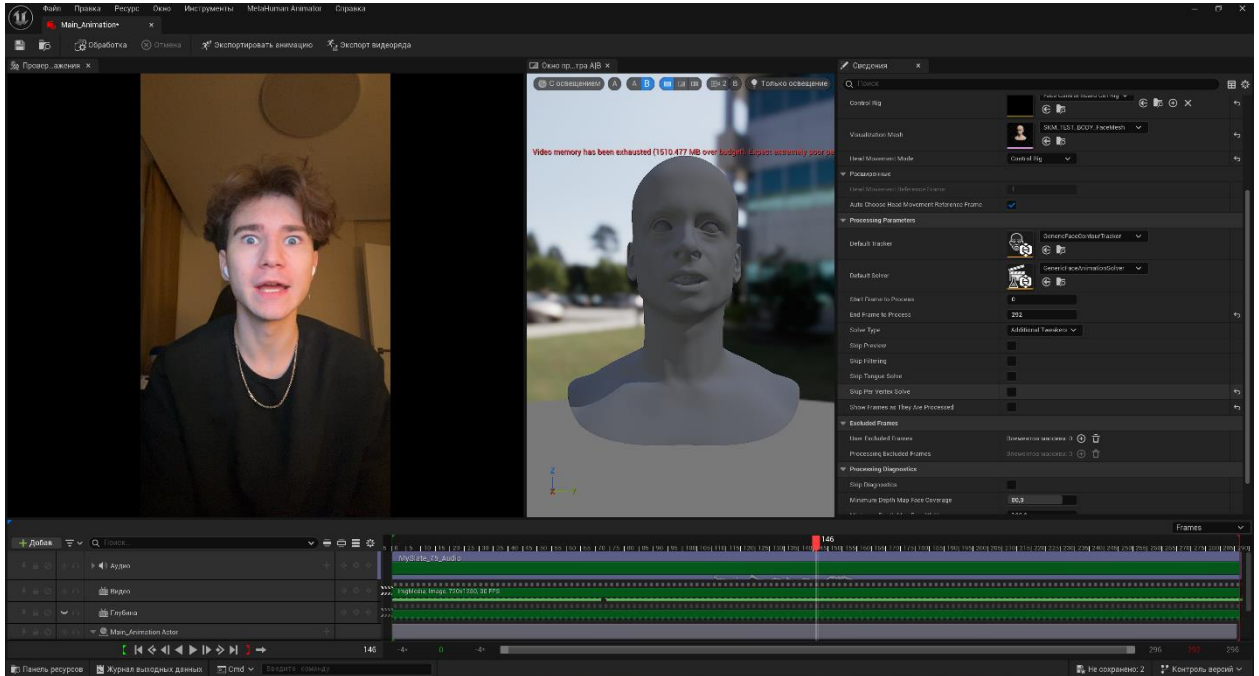


Рисунок 5.12 – Модуль MetaHuman Animator

5.7 Фіналізація візуального образу

Завершальний етап роботи полягав у художній трансформації отриманого цифрового двійника відповідно до специфіки технічного завдання. Оскільки концепція проєкту передбачала створення образу кіборга у стилістиці наукової фантастики, базовий фотореалістичний вигляд MetaHuman потребував глибокої стилізації та доопрацювання, що було реалізовано у середовищі Blender.

Ключовою перевагою обраного гібридного пайплайну стала можливість вільної міграції даних між програмними середовищами без втрати функціональності. Лицьова анімація, записана та оброблена в Unreal Engine за допомогою Live Link Face, була успішно перенесена на 3D-модель у Blender. Для цього було використано спеціалізований інструментарій

PolyHammer, який дозволив експортувати не лише геометрію, а й запечені дані анімаційних кривих. Це забезпечило збереження всіх мікрорухів міміки, отриманих під час захоплення, у новому середовищі редагування.

Процес фіналізації візуального образу включав наступні кроки, що демонструють гнучкість розробленого методу:

Модифікація матеріалів та шейдинг. Відповідно до концепту, натуралістичну текстуру людської шкіри було замінено на складний синтетичний матеріал, що імітує білу глянцеvu кераміку [24]. Це дозволило досягти ефекту штучного, але антропоморфного організму.

Геометрична трансформація. На поверхню голови було додано накладні механічні елементи та деталі екзоскелета, які інтегровані у форму черепа. Завдяки чистоті топології, отриманій на етапі ретопології, ці маніпуляції не викликали артефактів під час деформації сітки при анімації.

Заміна оптичної системи. Для підтвердження модульності та гнучкості гібридного методу було проведено повну заміну очей. Стандартні анатомічні моделі очних яблук MetaHuman були видалені, а на їх місце інтегровано кастомну 3D-модель роботизованих очей із налаштованим світінням блакитного кольору (рис. 5.13).

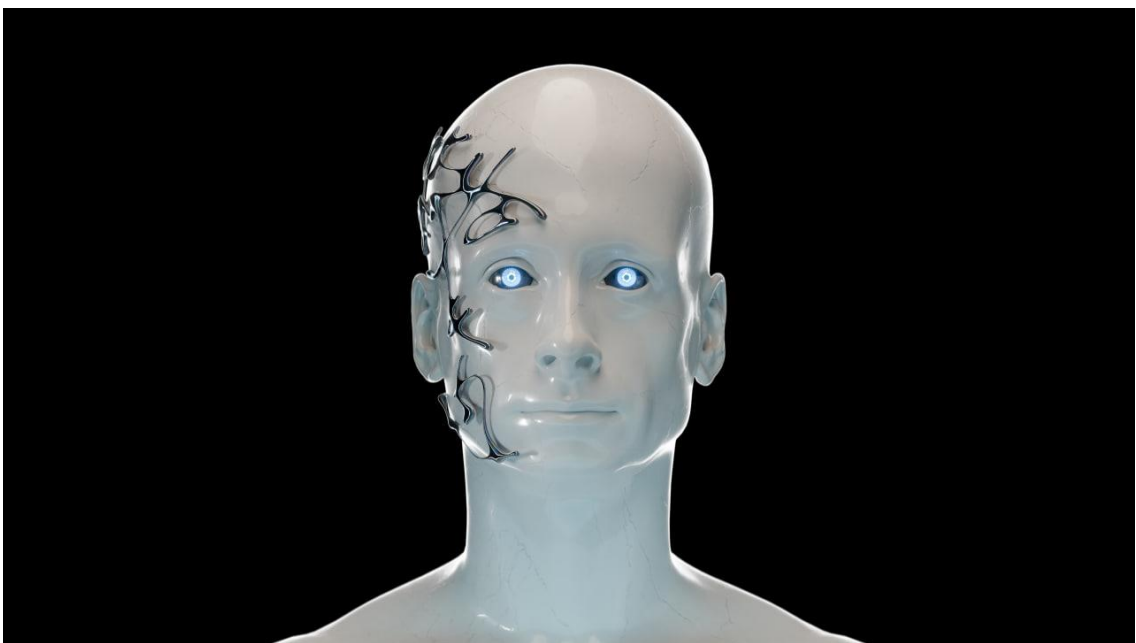


Рисунок 5.13 – Фіналізація візуального образу

Фінальний етап включав налаштування сцени: виставлення контрастного студійного освітлення для підкреслення рельєфу механічних деталей та бліків на глянцеvih поверхнях, а також кінцевий рендеринг у рушії Cycles.

Результат (рис. 5.13) демонструє, що запропонований гібридний метод не обмежує художника рамками стандартних пресетів MetaHuman. Навпаки, він слугує потужною технічною базою, яка дозволяє виконувати складні технічні завдання, від реалістичного портрета до стилізованого кіборга, зберігаючи при цьому високу якість анімації та значно скорочуючи час на технічну рутину.

6 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

6.1 Характеристика науково-дослідної роботи

Метою цього розділу є економічне обґрунтування доцільності використання розробленого гібридного пайплайну для створення реалістичного 3D-персонажа.

В роботі порівнюються два підходи до створення цифрового аватара:

- базовий підхід: передбачає повний цикл ручного скульптингу, ретопології, текстурування та ручного створення скелету і скіннінгу;
- запропонований підхід: використання фотограмметрії, MetaHuman Creator, інструментарію PolyHammer/Blender та технології Live Link Face.

Реалізація запропонованого рішення дозволяє значно скоротити час на найбільш трудомісткі етапи (скульптинг, ригінг обличчя) та отримати результат AAA-якості силами одного спеціаліста.

6.2 Етапи виконання НДР, їх трудомісткість та заробітна плата

Під час виконання науково-дослідної роботи (НДР) було реалізовано повний цикл створення цифрового персонажа: від захоплення реальних даних до фінальної симуляції в ігровому рушії.

Умовно процес можна розділити на три взаємопов'язані етапи: підготовчий, основний та заключний.

На підготовчому етапі було проаналізовано можливості сучасних інструментів (Unreal Engine 5, MetaHuman Creator) та організовано технічний сетап для фотограмметрії. Ключовим завданням тут було налаштування освітлення та обладнання для отримання якісного вихідного матеріалу

Основний етап включав найбільший обсяг інженерних та художніх задач: створення скан-моделі, «чистку» топології та прив'язку геометрії до

системи MetaHuman. Окрему увагу було приділено кастомізації рігу з використанням інструментарію PolyHammer та Blender, що дозволило зберегти унікальні риси обличчя при використанні стандартних анімаційних блупринтів. Також на цьому етапі було створено тіло персонажа та налаштовано волосся.

У заключній частині проводяться: аналіз результатів виконання НДР, складання звіту з НДР та його захист. Інтеграція моделі в середовище Unreal Engine 5 та перевірка коректності роботи лицьових анімацій через технологію Live Link Face. На основі отриманих результатів було сформовано висновки щодо ефективності запропонованого гібридного пайплайну.

Для виконання роботи було залучено 3 особи: 3D Technical Artist, заробітна плата – 35000,00 грн/міс.; асистент, заробітна плата – 15000,00грн/міс.; керівник роботи, заробітна плата – 20 000,00 грн/міс.

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

$$Z_{\text{ср.дн.}} = \frac{Z_{\text{ср.міс.}}}{n}, \quad (6.1)$$

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

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

Підставивши дані, отримаємо:

– 3D Technical Artist – 1590,91 грн/день;

– керівник роботи – 909,09 грн/день;

– асистент – 681,82 грн/день.

Етапи виконання НДР, перелік і зміст робіт, трудомісткість їх виконання, заробітна плата виконавців робіт представлені у таблиці 6.1.

Таким чином, сума витрат на заробітну плату в межах виконання НДР складе 27045,47 грн.

Таблиця 6.1 – 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. Аналіз інструментарію (UE5, MHC)		3D Technical Artist	2	1590,91	3181,82
1.2 Підготовка сетапу для фотограмметрії		3D Technical Artist	1	1590,91	1590,91
2. Основний етап					
2.1 Створення 360° скану та обробка		Асистент	1	681,82	681,82
2.2 Чистка топології та ідентифікація в MHC		3D Technical Artist	1	1590,91	1590,91
		Асистент	1	681,82	681,82
2.3 Робота з DNA та рігінг (PolyHammer)		3D Technical Artist	5	1590,91	7954,55
2.4 Створення тіла та волосся		3D Technical Artist	2	1590,91	3181,82
2.5 Налаштування Live Link Face		3D Technical Artist	2	1590,91	2749,08
3. Заключний етап					
3.1 Тестування анімації в UE5		3D Technical Artist	2	1590,91	3181,82
3.2 Технічне оформлення звіту про виконання НДР		Керівник роботи	2	909,09	1818,18
Усього			19		27 045,47

6.3 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 27045,47 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 5950,00 грн.

Витрати на електроенергію розраховуються, виходячи зі споживаної потужності пристрою і тарифу на електроенергію. У даному випадку передбачається використання комп'ютера потужністю 0,6 кВт/год. Вартість однієї кВт/год електроенергії прийнято у розмірі 4,32 грн. Витрати на використану обладнанням електроенергію (B_e) розраховуються за формулою:

$$B_e = M \cdot t \cdot T_{кВм}, \quad (6.2)$$

$$B_e = (0,6 \times 152 \times 4,32) = 393,98 \text{ грн.}$$

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

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

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

Підставивши значення у (6.2), визначимо величину витрат (B_e) на спожиту електроенергію:

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:

$$AB = \sum_{k=1}^L \frac{BO_k}{TE_k} \times T, \quad (6.3)$$

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.

Загальна вартість обладнання, що використовується під час виконання НДР, дорівнює 80000,00 грн.

Підставивши відомі значення у (6.3), визначимо величину амортизаційних відрахувань:

$$AB = \frac{80000,00 \times 19}{762} = 1994,75 \text{ грн.}$$

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 5409,09 грн.

Вартість оплати послуг зв'язку, а саме Інтернет – 350,00 грн. за 19 днів 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 використовувалася низка програмного забезпечення. Для розробки використовувався Blender та UE5. Використане

програмне забезпечення та сервіси безкоштовні. Вартість ліцензії допоміжного аддону PolyHammer складає 2150,00 грн. та враховується у загальному кошторисі витрат.

Результати розрахунку кошторису витрат, тобто одноразових витрат, на виконання НДР, наведені у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Кошторис витрат на розробку НДР

	Стаття витрат	Сума, грн
1	Заробітна плата	27045,47
2	Єдиний соціальний внесок (22 % від п.1)	5950,00
3	Амортизація основних засобів	1994,75
4	Витрати на спожити електроенергію	393,98
5	Інші витрати	
5.1	Адміністративні витрати (20 % від п.1)	5409,09
5.2	Вартість послуг зв'язку	350,00
5.3	Вартість ліцензії PolyHammer	2150,00
	Усього витрати	43293,29

Таким чином, кошторис витрат на виконання даної НДР складає 43293,29 грн.

6.4 Оцінка результатів науково-дослідної роботи

Результат – це наслідок послідовності дій, виконаних під час НДР, виражений якісно або кількісно. В загальному випадку оцінка результатів НДР – це визначення ефективності отриманих рішень порівняно з існуючим рівнем технологічного процесу.

Відповідно до теми даного дослідження у якості результату впровадження НДР визначено зменшення часу на створення 3D-персонажа при використанні розробленого гібридного пайплайну (сканування + MetaHuman + PolyHammer) порівняно з повністю ручним методом виробництва. Результат від впровадження НДР визначається за формулою:

$$\Delta P_j = |X_{\text{б}j} - X_{\text{н}j}|, \quad (6.4)$$

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.

В експериментальній частині розглянуто час, необхідний для повного циклу створення персонажа згідно з технічним завданням. Отримані порівняльні дані наведено у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Порівняння показників ефективності створення персонажа

Показник	Базовий підхід	Розроблений метод	Економія (Різниця)
Час виконання, днів	35	19	16

Підставивши відповідні значення до (6.4), визначимо результат від впровадження НДР у чисельному вигляді:

$$\Delta P_1 = 35 - 19 = 16 \text{ днів.}$$

На основі обчислень можна стверджувати, що використання розробленого гібридного пайплайну на 16 робочих днів ефективніше, ніж використання класичного ручного моделювання для досягнення аналогічного рівня візуальної якості.

6.5 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:

$$K_{ев} = \frac{\Delta P_j}{B_p}, \quad (6.5)$$

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 (6.5), розрахуємо чисельне значення коефіцієнту «ефект-витрати» розробленого рішення порівняно з загальними рішеннями:

$$K_{ев(Manual)} = \frac{16}{43293,29} \times 100 \% = 0,037 \%$$

У результаті проведених досліджень, можна зробити висновок про те, що дана НДР має позитивний показник економічної ефективності. Використовуючи розроблену методику, можна стверджувати, що інвестиції у розробку та впровадження нового пайплайну є виправданими, оскільки забезпечують суттєве скорочення виробничого циклу. Роботу можна вважати ефективною та такою, що має високий науковий і технічний рівень, дозволяючи оптимізувати ресурси при створенні цифрових персонажів.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження процесу створення та анімації реалістичного 3D-портрета людини, а також розроблено та експериментально перевірено гібридний пайплайн, що поєднує технології фотограмметрії, процедурної генерації та ручного доопрацювання.

Встановлено, що створення цифрового двійника людини є одним із найскладніших завдань у сфері CGI через високі вимоги до анатомічної точності та проблему «зловісної долини». Аналіз традиційного методу ручного моделювання виявив його суттєві недоліки: надмірну ресурсну витратність, необхідність залучення вузькопрофільних спеціалістів та високий ризик людської помилки. Водночас використання чистих даних 3D-сканування без обробки є неможливим через хаотичну топологію, непридатну для анімації.

Було сформульовано та реалізовано гібридний пайплайн, який базується на інтеграції інструментарію MetaHuman в екосистему професійного 3D-софту. Цей підхід дозволяє автоматизувати найбільш трудомісткі технічні етапи – ретопологію, побудову кісткової системи та налаштування вагових коефіцієнтів.

Порівняльний експеримент за участю експертної групи довів перевагу запропонованого методу над традиційним. Часова ефективність: використання гібридного методу дозволило скоротити виробничий цикл з 35 до 19 днів, що становить економію часу майже на 45%. Якість та оптимізація: експертне оцінювання зафіксувало найвищий рівень узгодженості думок у критерії «Оптимізація» на користь гібридного методу. Це підтверджує, що автоматизована генерація технічної бази персонажа не поступається ручній роботі за якістю, але значно виграє у швидкості.

У практичній частині роботи було успішно виконано технічне завдання зі створення анімованого 3D-бюста артиста у стилістиці наукової фантастики для концертного шоу. Особливу увагу було приділено демонстрації гнучкості розробленого пайплайну. Використання аддону PolyHammer дозволило розірвати замкнене коло екосистеми Unreal Engine і перенести повністю налаштованого персонажа разом із запеченою анімацією Live Link Face у середовище Blender. Це дало можливість провести глибоке редагування: замінити текстуру шкіри на інші матеріали, інтегрувати механічні елементи та повністю замінити модель очей, не втративши при цьому коректності роботи лицьового пігу.

Застосування технології Live Link Face у поєднанні з MetaHuman Animator дозволило досягти високої точності відтворення мимики та артикуляції без використання дороговартісного обладнання для «Motion Capture». Система успішно впоралася з передачею рухів, що є критично важливим для сприйняття реалістичності образу на великих екранах.

Гіпотеза дослідження повністю підтвердилася. Гібридний пайплайн є оптимальним рішенням для створення персонажів AAA-рівня в умовах обмежених часових та людських ресурсів. Він знижує поріг входження у професію створення цифрових людей, дозволяючи 3D-художнику зосередитися на творчих та художніх аспектах, довіривши технічну рутину процедурним інструментам, при цьому залишаючи повну свободу для модифікацій у сторонніх 3D-редакторах.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Brilliant, K. (2003). Building a Digital Human. Hingham: Charles River Media. (p. 67-69).
2. Tinwell, A. (2014). The Uncanny Valley in Games and Animation. Boca Raton: CRC Press. (p. 87-92).
3. O'Neill, R. (2015). Digital Character Development: Theory and Practice. Boca Raton: CRC Press. (p. 24-28).
4. Spencer, S. (2010). ZBrush Digital Sculpting Human Anatomy. Indianapolis: Sybex. (p. 55-61).
5. Blender. (n. d.). Free and Open 3D Creation Software. <https://www.blender.org/>.
6. Reallusion. (n. d.). Character Creator 4: 3D Character Creation Software. <https://www.reallusion.com/character-creator/>.
7. Autodesk. (n. d.). Autodesk Maya: 3D Animation & VFX Software. <https://www.autodesk.com/products/maya/overview>.
8. Epic Games. (n. d.). Unreal Engine 5: The World's Most Open and Advanced Real-Time 3D Creation Tool. <https://www.unrealengine.com/en-US/unreal-engine-5>.
9. Maxon. (n. d.). ZBrush: The World's Leading Digital Sculpting Solution. <https://www.maxon.net/en/zbrush>.
10. Daz 3D. (n. d.). Daz Studio: Free 3D Art Software. https://www.daz3d.com/daz_studio.
11. CLO Virtual Fashion. (n. d.). Marvelous Designer: The Best 3D Clothing Design Software. <https://www.marvelousdesigner.com/>.
12. Adobe. (n. d.). Substance 3D Painter: The Industry Standard for 3D Texturing. <https://www.adobe.com/products/substance3d-painter.html>.

13. Epic Games. (n. d.). Live Link Face in Unreal Engine. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/live-link-face-in-unreal-engine>.
14. Polycam. (n. d.). Polycam: The Leading 3D Capture App for LiDAR & Photogrammetry. <https://polycam.com/>.
15. Poly Hammer. (n. d.). Meta-Human DNA Addon: Import and Edit MetaHuman DNA in Blender. <https://www.polyhammer.com/meta-human-dna-addon>.
16. Statistics How To. (n. d.). Kendall's W Statistic: Definition, Formula & Examples. <https://www.statisticshowto.com/w-statistic/>.
17. 80 Level. (2022). Making Game-Ready Faces Using Photogrammetry & Unreal Engine. <https://80.lv/articles/making-game-ready-faces-using-photogrammetry-unreal-engine>.
18. Easy3DPrint. (2025). Як сканувати деталь для 3D-принтера - повний гід. <https://easy3dprint.com.ua/uk/yak-skanuvati-detal-dlya-3d-printera/>.
19. Exoside. (n. d.). Quad Remesher: Auto Retopology Plugin. <https://exoside.com/quadremesher/>.
20. Epic Games. (n. d.). MetaHuman Creator User Guide. <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/metahuman/metahuman-creator-user-guide>.
21. Unreal Engine. (2021). MetaHuman Creator Early Access Out Now: Meet the Team. <https://www.youtube.com/watch?v=OeUBATSJSr0>.
22. Apple. (2024). About Face ID advanced technology. <https://support.apple.com/en-us/102381>.
23. Вовк, О.В., Григор'єв, О.В., & Біла, Д.С. (2025). Особливості створення 3D-анімації для трейлерів відеоігор у середовищі Blender. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 2. (с. 12-13).
24. Textures.com. (n. d.). Textures for 3D, Graphic Design and Photoshop. <https://www.textures.com//>