

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ AR/VR У КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

Виконала: студентка групи 1К-22

Спеціальності

123 Комп'ютерна інженерія

Євгенія КОНДРАТЕНКО

Керівник:

Павло РАТАЙЧУК

Черкаси 2026

ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ФАХОВИЙ БІЗНЕС-КОЛЕДЖ
Циклова комісія комп'ютерної інженерії та інформаційних технологій
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
Освітня програма Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка циклової комісії КІ та ІТ

Наталя ФАЛЬЧЕНКО

«_____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кондратенко Євгенія Володимирівна

1. Тема кваліфікаційної роботи Застосування технологій AR/VR у комп'ютерних мережах

Керівник роботи Ратайчук Павло Єгорович, викладач вищої категорії затверджені наказом закладу фахової перед вищої освіти від «6» жовтня 2025 року № 84/1-у.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 08.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: наукова та технічна література з тематики доповненої та віртуальної реальності (AR/VR); характеристики мережевого обладнання Cisco; мережеві протоколи передачі даних TCP/IP, UDP, RTP, HTTP/HTTPS; технології бездротового зв'язку Wi-Fi та 5G; програмне середовище Cisco Packet Tracer; моделі комп'ютерних мереж для підтримки AR/VR-додатків; засоби аналізу продуктивності мереж та забезпечення інформаційної безпеки..

4. Зміст кваліфікаційної роботи: дослідження концепції та принципів функціонування технологій доповненої та віртуальної реальності; аналіз архітектури AR/VR-систем та їх основних компонентів; дослідження вимог AR/VR-додатків до комп'ютерних мереж; аналіз сучасних мережевих технологій та протоколів передачі даних; дослідження впливу затримок, пропускну здатності та якості обслуговування на роботу AR/VR-систем; аналіз методів забезпечення інформаційної безпеки; огляд сучасних сфер застосування технологій AR/VR; проектування мережевої інфраструктури для підтримки AR/VR-додатків; порівняння дротових та бездротових технологій зв'язку; економічне обґрунтування впровадження AR/VR-рішень; розробка та моделювання комп'ютерної мережі у Cisco Packet Tracer; тестування працездатності та оцінка ефективності створеної моделі.

5. Дата видачі завдання 15.09.20

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів	Примітка про виконання
1	Вступ	14.10.2025	
2	Розділ 1 теоретичні основи AR/VR та їх мережева інтеграція	09.12.2025	
3	Розділ 2 Аналіз мережевих рішень для підтримки AR/VR-додатків	10.03.2026	
4	Розділ 3 Практичне моделювання мережі для підтримки AR/VR-додатку	28.04.2026	
5	Висновки	12.05.2026	
6	Оформлення кваліфікаційної роботи (чистовий варіант)	20.05.2026	
7	Перевірка кваліфікаційної роботи на наявність ознак плагіату (за 10 днів до захисту)	05.06.2026	
8	Подання кваліфікаційної роботи на затвердження завідувачу ЦК (за 7 днів до захисту)	08.06.2026	

Студент

Євгенія КОНДРАТЕНКО

Керівник роботи

Павло РАТАЙЧУК

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню застосування технологій доповненої та віртуальної реальності в комп'ютерних мережах. У роботі розглянуто особливості функціонування AR/VR-додатків, їх архітектуру, мережеві вимоги та протоколи передачі даних. Проаналізовано використання технологій 5G, периферійних обчислень (Edge Computing) та хмарних сервісів для забезпечення ефективної роботи систем доповненої та віртуальної реальності.

Метою роботи є дослідження особливостей функціонування AR/VR-додатків у комп'ютерних мережах та моделювання мережевої інфраструктури для оцінювання впливу мережевих параметрів на якість їх роботи.

Об'єктом дослідження є процес функціонування AR/VR-додатків у комп'ютерних мережах. Предметом дослідження є мережеві технології, протоколи передачі даних, параметри мережі та механізми забезпечення якості обслуговування, що впливають на ефективність роботи AR/VR-систем.

У практичній частині роботи виконано моделювання мережі для підтримки багатокористувацького VR-додатку в середовищі Cisco Packet Tracer. Розроблено клієнт-серверну топологію мережі, досліджено вплив пропускної здатності каналу, затримки передачі даних та мережевого навантаження на якість функціонування системи.

Результати роботи можуть бути використані під час проектування та оптимізації комп'ютерних мереж для підтримки сервісів доповненої та віртуальної реальності в освітніх, промислових та комерційних середовищах. Рівень впровадження роботи є навчально-дослідним і передбачає використання отриманих результатів для подальших досліджень та вдосконалення мережевої інфраструктури AR/VR-систем.

Ключові слова: ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, AR/VR, КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ, МЕРЕЖЕВИЙ ТРАФІК, ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ, ЗАТРИМКА ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ, QoS, EDGE COMPUTING, CISCO PACKET TRACER.

ABSTRACT

The qualification thesis is devoted to the study of the application of Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) technologies in computer networks. The paper examines the operational features of AR/VR applications, their architecture, network requirements, and data transmission protocols. The use of 5G technologies, Edge Computing, and cloud services for supporting AR/VR systems is analyzed.

The purpose of the thesis is to investigate the operation of AR/VR applications in computer networks and to model a network infrastructure for evaluating the impact of network parameters on their performance.

The object of the research is the process of AR/VR application operation in computer networks. The subject of the research is network technologies, data transmission protocols, network parameters, and Quality of Service (QoS) mechanisms affecting the efficiency of AR/VR systems.

In the practical part of the thesis, a network supporting a multi-user VR application was modeled using Cisco Packet Tracer. A client-server network topology was developed, and the influence of bandwidth, transmission delay, and network load on system performance was investigated. AR/VR traffic transmission was analyzed, and the effectiveness of QoS mechanisms for prioritizing critical data flows was evaluated.

The obtained results can be used in the design and optimization of computer networks intended for augmented and virtual reality services in educational, industrial, and commercial environments. The implementation level of the work is educational and research-oriented, providing a basis for further studies and improvements of AR/VR network infrastructures.

Keywords: AUGMENTED REALITY, VIRTUAL REALITY, AR/VR, COMPUTER NETWORKS, NETWORK TRAFFIC, BANDWIDTH, LATENCY, QoS, EDGE COMPUTING, CISCO PACKET TRACER.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

AR – Augmented Reality (доповнена реальність)

VR – Virtual Reality (віртуальна реальність)

VRET – Virtual Reality Exposure Therapy (експозиційна терапія з використанням віртуальної реальності)

QoS – Quality of Service (якість обслуговування)

QoE – Quality of Experience (якість користувацького досвіду)

TCP – Transmission Control Protocol (протокол керування передачею)

UDP – User Datagram Protocol (протокол користувацьких датаграм)

RTP – Real-time Transport Protocol (протокол передачі даних у реальному часі)

DSCP – Differentiated Services Code Point (позначка диференційованих послуг)

PQ – Priority Queuing (пріоритетне чергування)

CBWFQ – Class-Based Weighted Fair Queuing (класове зважене справедливе чергування)

SDN – Software-Defined Networking (програмно-визначені мережі)

PDU – Protocol Data Unit (одиниця даних протоколу)

IP – Internet Protocol (міжмережевий протокол)

LAN – Local Area Network (локальна обчислювальна мережа)

ISP – Internet Service Provider (провайдер послуг Інтернету)

HD – High Definition (висока роздільна здатність)

4K – Ultra High Definition (надвисока роздільна здатність)

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ AR/VR ТА ЇХ МЕРЕЖЕВА ІНТЕГРАЦІЯ.....	12
1.1. Поняття та еволюція технологій доповненої та віртуальної реальності...	12
1.2. Архітектура AR/VR-систем	16
1.3. Мережеві вимоги AR/VR-додатків	20
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕРЕЖЕВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ AR/VR-ДОДАТКІВ.....	27
2.1. Клієнт-серверні архітектури та edge computing у AR/VR	27
2.2. Методи оптимізації трафіку.....	31
2.3. Балансування навантаження в мережах AR/VR	33
2.4. Питання кібербезпеки в AR/VR-мережах	38
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПІДТРИМКИ AR/VR-ДОДАТКУ	44
3.1. Постановка задачі моделювання	44
3.2. Вибір приграмного середовища для моделювання	45
3.3. Розробка топології мережі	48
3.4. Моделювання навантаження AR/VR-трафіку.....	52
3.5. Дослідження впливу затримки та пропускної здатності на якість роботи AR/VR.....	54
3.6. Реалізація механізмів QoS.....	56
ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
ДОДАТОК А КОНФІГУРАЦІЯ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМИ	66

ВСТУП

Технології доповненої (Augmented Reality, AR) та віртуальної реальності (Virtual Reality, VR) належать до перспективних напрямів розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних систем. Їх використання поступово виходить за межі розважальної індустрії та охоплює освіту, медицину, промисловість, військову сферу, проєктування, телекомунікації та дистанційну взаємодію користувачів. Основною особливістю AR/VR-додатків є необхідність формування інтерактивного цифрового середовища, у якому користувач отримує можливість взаємодіяти з віртуальними об'єктами в режимі реального часу. Для забезпечення такої взаємодії необхідна передача значних обсягів даних між клієнтськими пристроями та серверною інфраструктурою з мінімальними затримками та високим рівнем надійності.

Розвиток AR/VR-технологій безпосередньо пов'язаний із розвитком комп'ютерних мереж. Передача тривимірної графіки, відеопотоків високої роздільної здатності, телеметричних даних та інформації про положення користувача створює суттєве навантаження на мережеву інфраструктуру. На відміну від традиційних вебзастосунків або мультимедійних сервісів, системи віртуальної та доповненої реальності є надзвичайно чутливими до затримки передачі даних, втрати пакетів та нестабільності мережевого з'єднання. Навіть незначне погіршення характеристик мережі може призвести до зниження якості користувацького досвіду, порушення синхронізації об'єктів віртуального середовища та виникнення дискомфорту під час роботи з AR/VR-системами. Особливої актуальності дана проблема набула у зв'язку з активним впровадженням хмарних обчислень, технологій edge computing, мобільних мереж п'ятого покоління та розподілених клієнт-серверних архітектур. Сучасні AR/VR-додатки дедалі частіше використовують віддалені сервери для обробки графічних даних і синхронізації роботи багатьох користувачів одночасно. У таких умовах якість функціонування додатків значною мірою визначається характеристиками мережевого середовища, зокрема пропускну здатністю, затримкою передачі даних, рівнем втрати пакетів та ефективністю механізмів

керування трафіком. Це обумовлює необхідність дослідження мережевих аспектів функціонування AR/VR-систем та пошуку ефективних підходів до їх оптимізації.

Питанням дослідження мережевої підтримки AR/VR-технологій присвячено праці багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. Значний внесок у розвиток теоретичних основ функціонування віртуальної реальності зробили Джарон Ланьєр, Махадев Сатьянараянан, Марк Клейпул, Клара Нарстедт та інші дослідники. У їхніх роботах розглядаються питання передачі мультимедійного трафіку, забезпечення якості обслуговування (QoS), якості користувацького досвіду (QoE), використання хмарних сервісів та периферійних обчислень для підтримки інтерактивних середовищ. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, проблема забезпечення ефективної роботи AR/VR-додатків у комп'ютерних мережах залишається актуальною через постійне зростання вимог до швидкості передачі даних і якості мережевих сервісів.

Актуальність теми кваліфікаційної роботи полягає у необхідності дослідження особливостей функціонування AR/VR-додатків у комп'ютерних мережах та визначення впливу мережевих параметрів на якість їх роботи. Аналіз мережевої інфраструктури та моделювання характерного AR/VR-трафіку дозволяють оцінити ефективність сучасних мережевих рішень і визначити умови, необхідні для стабільного функціонування таких систем. Результати дослідження можуть бути використані під час проектування мереж для підтримки сервісів віртуальної та доповненої реальності в освітніх, промислових і комерційних середовищах.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідити особливості застосування технологій доповненої та віртуальної реальності в комп'ютерних мережах, проаналізувати мережеві вимоги AR/VR-додатків та виконати моделювання мережевої інфраструктури для оцінювання впливу параметрів мережі на якість їх функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- дослідити принципи функціонування технологій доповненої та віртуальної реальності;
- проаналізувати архітектуру сучасних AR/VR-систем;
- визначити основні мережеві вимоги AR/VR-додатків;
- дослідити протоколи передачі даних, що використовуються в AR/VR-середовищах;
- проаналізувати використання технологій 5G, edge computing та хмарних сервісів для підтримки AR/VR;
- розглянути питання забезпечення якості обслуговування (QoS) та якості користувацького досвіду (QoE) у мережах AR/VR;
- розробити модель комп'ютерної мережі для підтримки AR/VR-додатку в середовищі Cisco Packet Tracer;
- виконати моделювання мережевого навантаження та дослідити вплив пропускної здатності й затримки передачі даних на якість роботи AR/VR-додатку;
- оцінити ефективність використання механізмів QoS для оптимізації передачі AR/VR-трафіку.

Об'єктом дослідження є процес функціонування AR/VR-додатків у комп'ютерних мережах.

Предметом дослідження є мережеві технології, протоколи передачі даних, параметри комп'ютерних мереж та механізми забезпечення якості обслуговування, що впливають на ефективність роботи AR/VR-додатків.

Під час виконання роботи використовувалися методи аналізу наукових джерел, порівняння та узагальнення інформації, методи комп'ютерного моделювання, а також засоби мережевого проектування в середовищі Cisco Packet Tracer. Для оцінювання характеристик мережі застосовувався аналіз показників пропускної здатності, затримки передачі даних і ефективності використання мережевих ресурсів.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проектування та оптимізації комп'ютерних

мереж, призначених для підтримки AR/VR-додатків. Розроблена модель мережі дозволяє оцінити вплив основних мережевих параметрів на якість функціонування систем віртуальної реальності та визначити шляхи підвищення ефективності передачі даних у таких середовищах.

Структура кваліфікаційної роботи складається зі вступу, трьох розділів, висновків та списку використаних джерел. У першому розділі розглянуто теоретичні основи технологій доповненої та віртуальної реальності та їх застосування в комп'ютерних мережах. Другий розділ присвячений аналізу мережевих технологій, протоколів передачі даних і методів забезпечення якості обслуговування в AR/VR-системах. У третьому розділі виконано практичне моделювання мережі для підтримки AR/VR-додатку в середовищі Cisco Packet Tracer та проведено аналіз отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ AR/VR ТА ЇХ МЕРЕЖЕВА ІНТЕГРАЦІЯ

1.1. Поняття та еволюція технологій доповненої та віртуальної реальності

Технології доповненої та віртуальної реальності стали одним із найперспективніших напрямів розвитку сучасних комп'ютерних систем і мереж. Їх активне впровадження спостерігається у сфері освіти, медицини, промисловості, розваг, військових технологій та телекомунікацій. Швидке зростання обчислювальних можливостей пристроїв, розвиток мережеских технологій та поява високошвидкісного інтернету значно розширили можливості використання AR та VR у повсякденному житті.

Доповнена реальність (AR) являє собою технологію, за допомогою якої до реального середовища додаються цифрові об'єкти, графіка, текст або інші віртуальні елементи. Користувач при цьому продовжує бачити навколишній світ, але з додатковими інформаційними шарами. Найчастіше AR реалізується за допомогою смартфонів, планшетів, спеціальних окулярів або шоломів.

Віртуальна реальність (VR) відрізняється тим, що повністю занурює користувача у штучно створене цифрове середовище. Для взаємодії з ним використовуються VR-шоломи, контролери руху, сенсори положення та інші пристрої. У результаті створюється ефект фізичної присутності у віртуальному просторі.

Починаючи з 1962 року, ця повністю занурювальна технологія базувалася на понятті «відстеження рухів голови», тобто користувачі пересували лише головою, щоб пережити нову реальність. Морт Гейліг створив Sensorama — пристрій у вигляді аркадного автомата з вібруючим сидінням і системою відтворення відчуттів на рис 1 Один із перших VR-пристроїв дозволяв здійснити віртуальну поїздку на мотоциклі вулицями Брукліна. Це дало поштовх ідеї використання VR-систем для покращення здоров'я та добробуту людей. Іван Сазерленд став відомим як «батько VR-дисплеїв» після створення пристрою з примітивним інтерфейсом користувача та реалістичним

віртуальним середовищем, що складалося з простих каркасних кімнат для візуалізації. Ця система відрзнялася від більшості інших, оскільки була підключена до комп'ютера, а не до камери. Куб, що ніби «плавав» у повітрі перед користувачем, став першим прикладом дисплея такого типу. Система складалася з шести підсистем: датчика положення голови, пристрою розділення зображення, векторного генератора, матричного множника, шолома (гарнітури) та універсального комп'ютера. Це була перша практична система віртуальної реальності в сучасному розумінні. Вона стала важливим винаходом, який заклав основу для появи численних VR-технологій, зокрема простих VR-гарнітур.

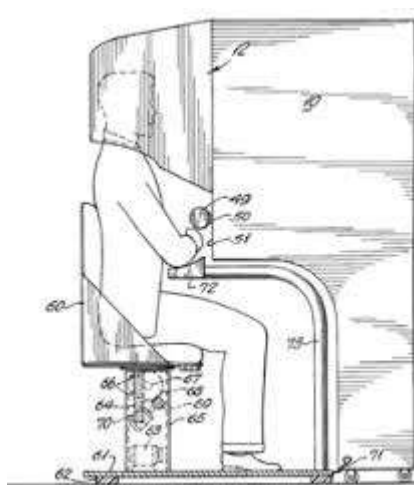


Рис 1 – вигляд sensorama

Інші системи включають інсталяцію Пола Сермона 1992 року Telematic Dreaming, яка перетворює ліжко на платформу для високоякісних зображень партнера, що може перебувати за тисячі кілометрів, але все одно виглядає надзвичайно реалістично. Інтенсивна світлова проекція іншого створює ефект присутності, який викликає відчуття, ніби дотик до проєктованого тіла є майже реальним приватним актом. Хоча очевидно, що фізично доторкнутися до іншого неможливо, як і в усіх середовищах віртуальної реальності, Сермон прагнув розширити сенсорне сприйняття користувача.

Такі системи, як Sensorama та пристрій Telematic Dreaming, взаємодіяли з користувачами через різні відчуття, включно з запахами та дотиком. Поступово, переходячи від фізичної взаємодії, шолом із дисплеєм (head-mounted display)

був спрямований на створення стереоскопічного зображення, яке спостерігалось через лінзи.

Доповнена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR) – це технології, що швидко розвиваються та революціонізували спосіб нашої взаємодії з цифровим контентом та фізичним світом. AR накладає цифровий контент на реальний світ, покращуючи сприйняття та взаємодію користувача з навколишнім середовищем. VR, з іншого боку, занурює користувача у віртуальне середовище, створюючи відчуття присутності та дозволяючи інтерактивний досвід. Протягом багатьох років технології AR та VR зазнали значного прогресу в апаратному та програмному забезпеченні, а також у дизайні користувацького досвіду. У сучасному світі VR (віртуальна реальність) використовується для широкого спектра застосувань, таких як військова підготовка, спорт, психічне здоров'я, освіта тощо. VR застосовують у навчальних симуляціях перед тим, як людина бере на себе відповідальність і ризики перебування на полі бою. Це забезпечує безпеку користувача та надає йому практичний досвід використання імітаційного бойового обладнання.

Терапія експозицією у віртуальній реальності (VRET) використовується для лікування посттравматичного стресового розладу (ПТСР), що виникає після багаторічних бойових дій або складних переживань [1]. Її метою є зменшення інтенсивності реакцій організму на спогади, які викликають страх. Однак вартість доступу до таких технологій була недоступною для кожного військового чи пацієнта. Програмне та апаратне забезпечення має контролюватися терапевтами для адаптації до індивідуальних потреб кожного випадку.

Віртуальна реальність також значною мірою сприяє тренуванням у спорті, наприклад у лижних перегонах (крос-кантрі). Цей вид спорту передбачає швидке пересування гірською місцевістю зі спусками та засніженими схилами. Інновації у дослідженні Вейніна Чена включали розробку алгоритмів для лижних симуляторів та проектування механічних структур для VR-систем [12]. Водночас слабкими сторонами експерименту були технологічні труднощі для

користувачів, що призводило до зниження задоволеності. 87% студентів зазначили, що технологія була складною у використанні, і лише 53% викладачів повідомили, що вона приносила їм задоволення. У ідеальному випадку цей показник має бути нижчим за 30%, щоб технологія була зручною та отримувала позитивні відгуки для подальших інвестицій. Щонайменше 75% викладачів повинні вважати цю технологію цікавою, щоб її впровадження було доцільним.

Попри численні переваги та можливості застосування VR, його поточна вартість створює проблеми доступності. Ціна цього продукту частково виправдана його функціоналом. Типова VR-гарнітура містить такі компоненти, як багатовимірне відтворення зображення, екрани високої роздільної здатності, гіроскопи, системи з кутом огляду 120° та інше [20]. Водночас існує перспектива зниження вартості VR-систем у майбутньому, оскільки збільшення масштабів виробництва призводить до зменшення витрат.

Хоча спочатку VR асоціювалася переважно з шоломами віртуальної реальності (HMD), технологія 3D-камер дала змогу застосовувати її й у сфері нерухомості через інтерактивні 3D-тури та візуалізації, подібні до тих, що використовує застосунок Zillow. Створюючи тури будинками за допомогою 360-градусної камери, Zillow впровадив віртуальну реальність як спосіб зручного перегляду житла перед купівлею. Інтерфейс із функцією «гортання» робить застосунок схожим на сервіс знайомств, оскільки користувач може переглядати «профіль» будинку та ознайомлюватися з усіма його особливостями, не виходячи з дому. Створення такого туру для будинку площею приблизно 3000 квадратних футів займає лише 10–15 хвилин і є ефективною та зручною альтернативою традиційним фотосесіям, які є дорожчими та потребують більше часу.

Основні досягнення в AR включають розробку безмаркерного відстеження, яке використовує методи комп'ютерного зору для відстеження реального середовища без необхідності використання маркерів або опорних маркерів, що призводить до більш природного та безперебійного досвіду AR. Ще одним значним досягненням є інтеграція AR у розумні окуляри, що

дозволяє використовувати AR без використання рук та знаходить потенційне застосування в охороні здоров'я, віддаленій допомозі та логістиці.

Серед відомих технологій AR є Microsoft HoloLens, Apple AR Kit, Google AR Core та Snapchat Lens Studio, які розширили можливості застосування AR у різних галузях промисловості та продовжують розвиватися в апаратному та програмному просторі [21]. AR та VR використовують різні технології для створення захопливого досвіду для користувачів. VR використовує гарнітуру, яка охоплює все поле зору користувача та забезпечує 360-градусний огляд віртуального середовища. Гарнітура оснащена датчиками, які відстежують рухи голови користувача, дозволяючи йому рухатися та взаємодіяти з віртуальним середовищем. AR, з іншого боку, накладає віртуальні об'єкти на реальний світ за допомогою камери та екрана. Камера фіксує реальне середовище, а екран накладає на нього віртуальні об'єкти в режимі реального часу.

Обидві ці технології зазнали значного зростання в останні роки та трансформували різні галузі та відкрили нові можливості для інновацій та застосування. Незважаючи на труднощі, постійний розвиток апаратного та програмного забезпечення, а також інструментів для створення контенту пропонує багатообіцяючі можливості для майбутнього AR та VR.

1.2. Архітектура AR/VR-систем

Системи віртуальної реальності можна класифікувати на 3 основні категорії. Це неімерсивні, імерсивні та напівімерсивні, залежно від однієї з важливих характеристик віртуальної реальності, а саме занурення, та типу інтерфейсів або компонентів, що використовуються в системі. Неімерсивна система віртуальної реальності, яку також називають настільною системою віртуальної реальності, системою Fish Tank або системою Window on World, є найменш імерсивною та найдешевшою з VR-систем, оскільки вимагає найменш складних компонентів. Вона дозволяє користувачам взаємодіяти з 3D-середовищем через стереомонітор та окуляри, інші поширені компоненти включають космічну кулю, клавіатуру та рукавички для обробки даних. Її сфери застосування включають моделювання та CAD-системи [24]. Імерсивна система

віртуальної реальності, з іншого боку, є найдорожчою та забезпечує найвищий рівень занурення; її компоненти включають HMD, пристрої відстеження, рукавички для обробки даних та інші, які охоплюють користувача комп'ютерною 3D-анімацією, що дає користувачеві відчуття приналежності до віртуального середовища. Одним з її застосувань є віртуальний огляд будівель. Напівзахоплююча VR-система, яку також називають гібридними системами або системою доповненої реальності, забезпечує високий рівень занурення, зберігаючи при цьому простоту настільної VR або використовуючи певну фізичну модель. Прикладом такої системи є CAVE (Cave Automatic Virtual Environment), а її застосуванням є симулятор водіння [8]. Розподілена VR, також відома як мережева VR, — це нова категорія VR-систем, яка існує в результаті швидкого розвитку Інтернету. Її метою є усунення проблеми відстані, дозволяючи людям з різних місць брати участь та взаємодіяти в одному віртуальному світі за допомогою Інтернету та інших мереж.

Компоненти систем віртуальної реальності

Система віртуальної реальності (VR) складається з двох основних підсистем: апаратного та програмного забезпечення. Апаратне забезпечення можна поділити на комп'ютер або VR-рушій і пристрої введення/виведення, тоді як програмне забезпечення складається з прикладних програм і бази даних на

рис 1.1.

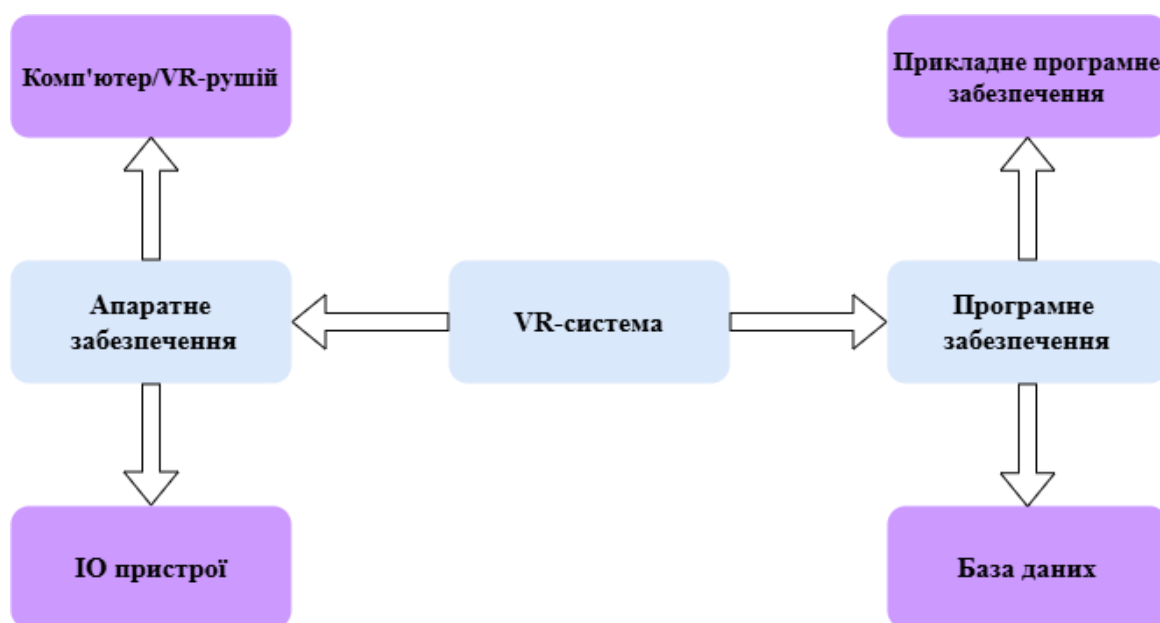


Рис 1.1 – Компоненти систем віртуальної реальності

Основними компонентами апаратного забезпечення є VR-рушій або комп'ютерна система, пристрої введення та пристрої виведення на рис 1.2

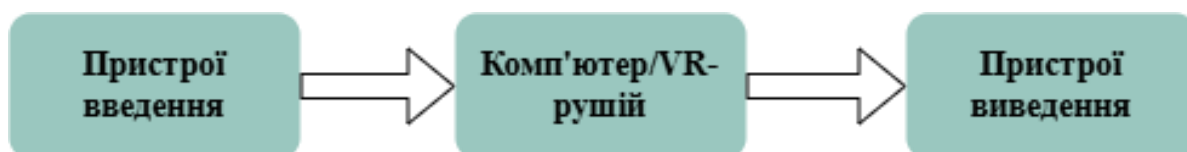


Рис 1.2 – Основні компоненти апаратного забезпечення

Пристрої введення

Пристрої введення є засобами взаємодії користувача з віртуальним світом. Вони передають системі сигнали про дії користувача, щоб забезпечити відповідну реакцію через пристрої виведення в режимі реального часу. Їх можна поділити на пристрої відстеження, пристрої точкового введення, біоконтролери та голосові пристрої.

Пристрої відстеження, які інколи називають датчиками положення, використовуються для визначення позиції користувача. До них належать електромагнітні, ультразвукові, оптичні, механічні та гіроскопічні датчики, рукавички даних, нейронні, біологічні або м'язові контролери [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Прикладами пристроїв точкового введення є миша з шістьма ступенями свободи (6DOF mouse). Їхня технологія є вдосконаленням звичайної комп'ютерної миші з розширеними функціями та підтримкою роботи у тривимірному просторі.

Голосове спілкування є природним способом взаємодії між людьми, тому його інтеграція у VR-системи є цілком логічною. Для цього можуть використовуватися системи розпізнавання та обробки голосу.

VR-рушій

У VR-системах VR-рушій або комп'ютерна система повинні підбиратися відповідно до вимог конкретного застосування. Одними з найважливіших і найбільш ресурсоємних завдань у VR є графічне відображення та генерація зображень.

Вибір VR-рушія залежить від сфери застосування, типу користувача, пристроїв введення/виведення, рівня занурення та необхідної якості графіки, оскільки саме він відповідає за обчислення та створення графічних моделей, рендеринг об'єктів, освітлення, мапування, текстурування, симуляцію та відображення в режимі реального часу.

Комп'ютер також забезпечує взаємодію з користувачем і виконує роль інтерфейсу між користувачем та пристроями введення/виведення.

Важливим фактором при виборі VR-рушія є обчислювальна потужність комп'ютера. Вона визначає кількість сенсорних ефектів (графіка, звук, тактильний зворотний зв'язок тощо), які можуть бути оброблені за певний проміжок часу. VR-рушій повинен оновлювати віртуальне середовище приблизно кожні 33 мс та забезпечувати симуляцію в реальному часі з частотою понад 24 кадри за секунду [11]. Крім того, графічний рушій має підтримувати створення стереоскопічного зображення.

VR-рушій може являти собою як стандартний персональний комп'ютер із високою продуктивністю та потужним графічним прискорювачем, так і розподілену комп'ютерну систему, з'єднану через високошвидкісну мережу передачі даних.

Пристрої виведення

Пристрої виведення отримують інформацію від VR-рушія та передають її користувачеві через відповідні канали для стимуляції органів чуття. Їх можна класифікувати відповідно до типу відчуттів: графічні (візуальні), аудіо (слухові), тактильні (контактні або силові), а також пристрої для передачі запаху та смаку.

Серед них найчастіше використовуються перші три типи, тоді як системи передачі запаху та смаку все ще залишаються малопоширеними.

Для візуального відображення найчастіше застосовують стереоскопічні монітори та шоломи віртуальної реальності (HMD), які забезпечують вищий рівень занурення. У HMD два незалежні зображення обробляються мозком таким чином, що створюється тривимірне сприйняття віртуального світу.

Аудіо або звук є надзвичайно важливим каналом у VR, поступаючись за значенням лише візуальному сприйняттю. Тривимірний звук дозволяє відтворювати звуки з різних напрямків, роблячи VR-додатки більш реалістичними.

Тактильний зворотний зв'язок використовується для того, щоб користувач міг «відчувати» віртуальні об'єкти. Це досягається за допомогою електронних сигналів або механічних пристроїв.

1.3. Мережеві вимоги AR/VR-додатків

На сьогодні більшість VR-додатків використовується у сфері ігор та розважального контенту. Через те, що значна частина сучасних VR-систем працює через дротове підключення, рівень мобільності та інтерактивності залишається обмеженим. Це особливо помітно у сценаріях дистанційної взаємодії користувачів. У зв'язку з цим мережеві VR-системи розглядаються як один із важливих напрямів розвитку сучасних комунікаційних технологій. Подальший розвиток глобальної інфраструктури Інтернету речей (IoT) пов'язується з інтеграцією технологій 5G та майбутніх мереж 6G [18]. Очікується, що такі мережі забезпечуватимуть наднизькі затримки передачі

даних та підтримуватимуть тактильний інтернет, який дозволить створювати максимально реалістичну взаємодію у VR-середовищах.

Однією з головних проблем VR-сервісів є передавання та зберігання панорамного відео — від моменту його захоплення камерою до відображення на пристрої користувача. Для реалізації цього процесу використовується складна технічна архітектура, яка включає відеозшивання, проєкційне перетворення, кодування та декодування відео, а також мережеві технології передачі даних.

Панорамне VR-відео створюється за допомогою декількох камер, які одночасно фіксують зображення під різними кутами. Оскільки кожна камера має власну площину проєкції, отримані кадри не можуть бути безпосередньо об'єднані без втрати візуальної цілісності. Через це перед зшиванням виконується спеціальне проєкційне перетворення зображень.

Проекційне перетворення

У 360-градусному відео кожне зображення формується окремою камерою з різним кутом огляду. Якщо такі зображення поєднати без попередньої обробки, виникають спотворення та порушується узгодженість панорамного зображення. Для усунення цієї проблеми використовується проєкційне перетворення.

Перед виконанням кодування відео усі отримані фрагменти переводяться у двовимірну площину. Для цього застосовуються різні методи проєкції, які дозволяють ефективно розмістити сферичне відео у форматі, придатному для обробки та передачі мережею.

Висока роздільна здатність VR-відео означає, що необхідно передавати величезний обсяг даних, що створює виклик для пропускну здатності та можливостей мережі працювати в режимі реального часу. Адаптивну потокову передачу панорамного/360-градусного відеоконтенту віртуальної реальності (VR) вважають складним завданням. Передача VR-відео потребує інтелектуальних технологій кодування та потокової передачі для задоволення сучасних і майбутніх потреб застосувань і сервісів. Наразі основні механізми

передачі базуються на схемі динамічної адаптивної потокової передачі через HTTP (DASH) та схемі передачі VR-відео.

Передача VR-відео на основі DASH

Для схеми DASH в OMAF з метою покращення використання пропускної здатності під час передачі VR-відео жертвують обсягом сховища [5]. Передача VR-відео здебільшого здійснюється за допомогою технології динамічної адаптивної потокової передачі із змінною швидкістю кодування та перспективою (ракурсом). Кожен ракурс містить кілька відеопотоків із різними бітрейтами, що зберігаються на DASH-сервері. Відповідно до інформації про ракурс на стороні клієнта, передається основний фрагмент потоку з вищим бітрейтом та інші фрагменти з нижчим бітрейтом. На рисунку 1.4 показано його технічну архітектуру.

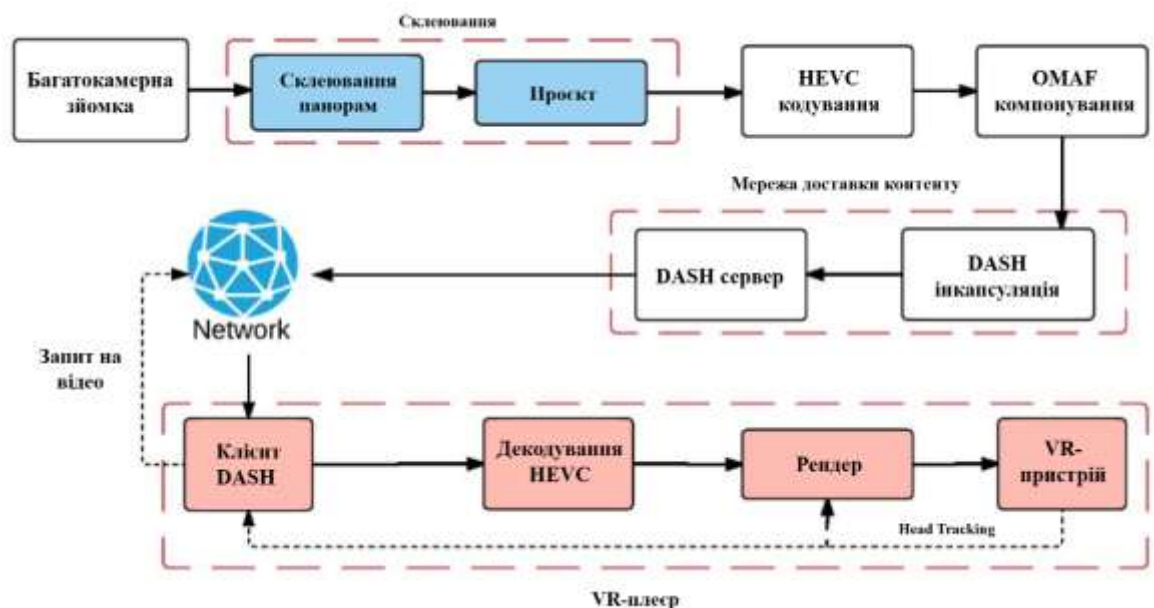


Рис 1.3 Мережа з архітектурою динамічного адаптивного потокового HTTP (DASH) та всенаправленого медіаформату (OMAF)

Упродовж останніх років деякі дослідження певною мірою покращили QoE (якість досвіду користувача) для потокового передавання 360° відео на основі фреймворку DASH [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Під час передачі VR 360-градусного відео користувач у кожний момент часу бачить лише частину панорами. Тому передача всього панорамного контенту

призводить до втрати пропускної здатності та обчислювальних ресурсів. Ці проблеми можна уникнути, використовуючи адаптивну передачу на основі точки огляду в DASH-системах. Для забезпечення плавного відтворення клієнт має попередньо завантажувати відеоконтент, що вимагає прогнозування майбутнього ракурсу користувача.

У роботі [Ошибка! Источник ссылки не найден.] було розроблено технологію потокової передачі відео в реальному часі з низькою затримкою на основі HTTP 2.0. При роботі з доступними VR-відеокліпами використовується нова функція server push у HTTP 2.0, яка дозволяє активно передавати потокове відео з вебсервера до клієнта, а механізм низької затримки на основі серверного push реалізовано у прототипі MPEG динамічної адаптивної потокової передачі через HTTP (DASH). У дослідженні [Ошибка! Источник ссылки не найден.] запропонували ефективний метод адаптивної передачі VR-відео через HTTP/2, який базується на транспортній архітектурі DASH і використовує пріоритизацію потоків та їх завершення. Для забезпечення адаптивності 360-градусне VR-відео поділяється на кілька граней, кожна з яких додатково ділиться на часові сегменти. VR-відео також зберігається на сервері на різних рівнях якості.

Виклики обчислювальної потужності мереж для VR

Мережеві застосування VR-пристроїв висувають безпрецедентні вимоги до обчислювальної потужності, особливо в процесі обробки VR-інформації, який є дуже ресурсоємним. Обробка VR-даних включає обчислювально складні завдання, такі як оцінка глибини сцени, семантичне розпізнавання зображень, реконструкція 3D-сцени та рендеринг із високим рівнем реалістичності, які повинні виконуватися в режимі реального часу для забезпечення природного та плавного досвіду користувача [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Затримка обробки VR визначається обчислювальною потужністю обчислювальних вузлів і обсягом обчислювального завдання. Хоча деякі віддалені хмарні сервери можуть частково зменшити навантаження, вони не завжди можуть гарантувати необхідний рівень затримки. Попри обмежену

обчислювальну потужність, кінцеві пристрої стикаються з суттєвими викликами [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Майбутні мобільні мережі інтегруватимуть мобільні граничні обчислення (MEC), VR-обробку та аналіз задач передачі на різних рівнях базових станцій для підтримки інтенсивних обчислень.

Як зазначалося вище, майбутні мобільні мережі інтегруватимуть MEC-вузли для надання обчислювальних і сховищних функцій, що дозволить покращити мобільний VR-контент і забезпечити різні аспекти мобільних VR-сервісів, наближених до користувача. Це ефективно вирішує проблеми багаторівневих обчислювальних можливостей мобільних терміналів та майбутніх потреб VR в мережах 5G.

Архітектура майбутніх мережесевих систем

Майбутня мережева архітектура забезпечить значні переваги для розвитку VR. Зокрема, характеристики інформаційно-орієнтованих мереж (Information-Centric Networking, ICN) підтримують локальну багатоадресну передачу та комунікацію типу «багато до багатьох», а також дозволяють об'єднувати спільні блоки для формування необхідної перспективи [9].

Проектування VR-систем

Для задоволення базових вимог віртуальної реальності та підвищення продуктивності систем з'явилися сучасні технології, а також було запропоновано низку практичних реалізацій систем потокової передачі VR-відео. До сучасних VR-систем належать, зокрема, FlashBack [Ошибка! Источник ссылки не найден.], Furion [23], LTE-VR [Ошибка! Источник ссылки не найден.] та Flare [22].

FlashBack [Ошибка! Источник ссылки не найден.]: Boos та ін. запропонували систему FlashBack для вирішення проблем, з якими стикаються пристрої на кшталт Google Cardboard і Samsung Gear VR, які мають обмежену потужність GPU та не можуть забезпечити прийнятну частоту кадрів і затримку. FlashBack заздалегідь обчислює та кешує всі можливі зображення, які може побачити користувач VR. Рендеринг виконується на етапі офлайн для

створення кешу панорамних зображень. Під час роботи система формує і підтримує багаторівневий індекс кешу, що дозволяє швидко знаходити зображення, які має бачити користувач. У разі відсутності даних у кеші використовується швидке наближення потрібного зображення, тоді як найбільш відповідні елементи завантажуються для подальших запитів. Крім того, FlashBack підходить не лише для статичних сцен, але й для динамічних сцен із рухомими та анімованими об'єктами.

Furion [23]:

Для забезпечення високоякісних VR-застосунків на звичайних мобільних пристроях, таких як смартфони, Lai та ін. представили Furion — фреймворк, який дозволяє реалізувати високоякісну іммерсивну мобільну VR на сучасних пристроях і бездротових мережах. Furion використовує ключові особливості VR-навантажень, зокрема передбачуваність взаємодії у передньому плані та стабільність фону, у порівнянні з рендеринговими процесами. Система застосовує архітектуру розділеного рендерингу, яка виконується одночасно на смартфоні та сервері. Це доповнюється відеокompresією, використанням панорамних кадрів і паралельним декодуванням на багатоядерних процесорах телефону.

LTE-VR [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

Tan та ін. розробили пристроєве рішення для мобільної VR, яке не потребує змін апаратного забезпечення пристрою або LTE-інфраструктури. LTE-VR адаптує сигнальні операції для зменшення затримок. Система використовує два інноваційні підходи: (1) крос-шарову (cross-layer) архітектуру для швидкого виявлення втрат пакетів і (2) використання лише доступної на пристрої побічної (side-channel) інформації для зменшення затримок сприйняття VR.

Flare [22]:

Qian та ін. розробили практичну систему потокової передачі VR-відео для звичайних мобільних пристроїв. Flare використовує адаптацію до поля зору користувача (viewport adaptive approach): замість завантаження всього панорамного відео система прогнозує майбутній напрям погляду користувача і

завантажує лише ту частину контенту, яку він імовірно переглядатиме. У порівнянні з попередніми методами Flare зменшує використання пропускної здатності або підвищує якість VR-контенту при тій самій пропускній здатності. Крім того, Flare є універсальним фреймворком для потокової передачі 360-градусного відео, який не залежить від конкретних технологій кодування відео.

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕРЕЖЕВИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДТРИМКИ AR/VR-ДОДАТКІВ

2.1. Клієнт-серверні архітектури та edge computing у AR/VR

Архітектури AR/VR можна класифікувати на хмарні AR/VR, периферійні AR/VR та периферійно-хмарні AR/VR. Класифікація базується на конкретному місці, де виконуються обробка та сервіси AR/VR. Функціонування систем доповненої та віртуальної реальності безпосередньо залежить від архітектури мережевої взаємодії між клієнтськими пристроями, серверами обробки даних та комунікаційною інфраструктурою. Для AR/VR-додатків характерними є високі вимоги до пропускної здатності мережі, мінімізації затримок, синхронізації потоків даних і забезпечення безперервності рендерингу тривимірного контенту. У зв'язку з цим традиційні клієнт-серверні підходи зазнали суттєвої трансформації під впливом edge computing, хмарних сервісів та мереж п'ятого покоління [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Класична клієнт-серверна архітектура передбачає централізовану модель взаємодії, у якій основні обчислювальні ресурси розташовуються на віддалених серверах або у дата-центрах, тоді як клієнтський пристрій виконує функції відображення контенту та передавання запитів. У контексті AR/VR це означає, що гарнітури віртуальної реальності, мобільні пристрої або окуляри доповненої реальності здійснюють збір сенсорних даних, після чого інформація передається на сервер для подальшої обробки, рендерингу або генерації віртуального середовища. Отримані результати повертаються клієнту у вигляді відеопотоку або інтерактивних об'єктів. Подібний підхід використовується у cloud VR-системах, де складні графічні обчислення виконуються на потужних GPU-серверах [17].

Перевагою централізованої архітектури є можливість використання високопродуктивних обчислювальних ресурсів без значного навантаження на мобільні пристрої. Крім того, централізація спрощує адміністрування, оновлення програмного забезпечення та управління даними користувачів. Проте для AR/VR-додатків така модель має низку суттєвих обмежень. Основною проблемою є затримка передавання даних між клієнтом і віддаленим сервером.

Навіть незначне збільшення затримки може призвести до втрати синхронізації між рухами користувача та візуалізацією сцени, що негативно впливає на Quality of Experience (QoE) та здатне викликати кіберхворобу (cybersickness). Для VR-систем критичною вважається затримка понад 20 мс, тоді як для AR-додатків високої точності вимоги можуть бути ще жорсткішими **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. У дослідженні демонструють, що традиційна cloud-архітектура не здатна ефективно підтримувати мобільні AR/VR-сервіси в умовах великої кількості одночасних користувачів та високої інтенсивності трафіку. Автори підкреслюють необхідність перенесення частини обчислень ближче до кінцевого користувача шляхом використання Multi-access Edge Computing [10].

Edge computing являє собою розподілену модель обчислень, у якій ресурси обробки даних розміщуються не лише у центральній хмарі, але й на периферії мережі — поблизу користувача або базових станцій мобільного зв'язку. У системах AR/VR це дозволяє скоротити час передавання даних, зменшити навантаження на магістральні канали та забезпечити обробку інформації у режимі реального часу. Основною ідеєю edge computing є наближення сервісів до джерела генерації даних. У результаті значна частина задач рендерингу, відстеження рухів, комп'ютерного бачення та просторового аналізу виконується на edge-вузлах, а не у віддалених дата-центрах [6]. У сучасних дослідженнях виділяють декілька типів архітектур AR/VR-систем. Першою є cloud-based architecture, у якій усі складні обчислення виконуються у хмарі. Другою є edge-based architecture, де ключові обчислювальні процеси переносяться на периферійні вузли мережі. Третій тип hybrid edge-cloud architecture поєднує можливості хмарної та периферійної обробки залежно від характеру навантаження, доступності ресурсів та поточного стану мережі. Саме гібридні моделі нині вважаються найбільш перспективними для масштабованих AR/VR-платформ **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Cloud-based архітектура забезпечує високу обчислювальну потужність та централізоване керування ресурсами, однак характеризується значними

затримками під час передачі відеопотоків високої роздільної здатності. Edge-based архітектура, навпаки, орієнтована на мінімізацію latency та підтримку сервісів реального часу, проте периферійні вузли мають обмежені обчислювальні ресурси порівняно з хмарними дата-центрами. Hybrid edge-cloud architecture дозволяє динамічно розподіляти навантаження між edge-серверами та хмарою, оптимізуючи використання ресурсів залежно від вимог застосунку [6].

Важливим компонентом edge-oriented AR/VR-систем є механізм offloading — перенесення обчислювальних задач із клієнтського пристрою на edge-вузол або хмарний сервер. Offloading використовується для зниження енергоспоживання мобільних пристроїв та прискорення виконання складних операцій. У AR/VR-додатках це може стосуватися рендерингу сцен, аналізу сенсорних даних, роботи алгоритмів SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), обробки відео або штучного інтелекту. Ефективність offloading залежить від пропускної здатності мережі, затримки, навантаження на edge-вузли та алгоритмів балансування ресурсів [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Окрему увагу дослідники приділяють концепції cloud-to-edge continuum, яка передбачає безперервну взаємодію між хмарними дата-центрами, edge-серверами, IoT-пристроями та кінцевими користувачами. У такій моделі ресурси мережі, зберігання та обчислень інтегруються у єдине середовище. Це дозволяє реалізовувати адаптивне управління AR/VR-сервісами залежно від поточних умов мережі та вимог користувачів [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Суттєвий внесок у розвиток edge computing для AR/VR зробили J. Ren, Y. He, G. Huang та інші дослідники, які запропонували ієрархічну архітектуру mobile augmented reality із введенням edge-рівня між користувачем та хмарою. Запропонована модель дозволила значно скоротити затримки обробки та енергоспоживання мобільних пристроїв порівняно з традиційними cloud-based системами [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Подальший розвиток edge computing тісно пов'язаний із впровадженням мереж 5G та перспективних

технологій 6G. Використання 5G забезпечує ultra-reliable low latency communication (URLLC), що є критично важливим для інтерактивних AR/VR-сценаріїв. Завдяки MEC-серверам, інтегрованим у базові станції, стає можливим виконання рендерингу та обробки даних практично у режимі реального часу. У дослідженнях Mohsen Hatami та співавторів зазначається, що саме поєднання edge computing, AI та 5G формує основу для розвитку real-time metaverse-систем **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Разом із перевагами edge computing виникають нові технічні проблеми. До них належать складність оркестрації сервісів, необхідність динамічного розподілу ресурсів, забезпечення безпеки даних та підтримка безперервної міграції сервісів між edge-вузлами. Оскільки користувачі AR/VR-систем часто перебувають у русі, система повинна оперативно переносити обчислювальні процеси між різними edge-серверами без втрати якості сервісу. Додатковою проблемою є гетерогенність edge-інфраструктури, що включає пристрої з різною продуктивністю та мережевими характеристиками [6]. У сучасних AR/VR-платформах дедалі активніше використовуються технології адаптивного рендерингу, прогнозування рухів користувача та AI-оптимізації мережевого трафіку. Це дозволяє зменшити навантаження на мережу та підвищити стабільність роботи сервісів. Наприклад, технології foveated rendering виконують високоточний рендеринг лише у зоні фокусування погляду користувача, що скорочує обсяг передаваних даних та навантаження на GPU-системи.

Клієнт-серверні архітектури залишаються базовою основою функціонування AR/VR-систем, однак розвиток інтерактивних сервісів реального часу зумовив перехід від централізованих cloud-моделей до розподілених edge-cloud архітектур. Використання edge computing забезпечує зменшення затримок, оптимізацію мережевого трафіку та підвищення якості користувацького досвіду. Водночас ефективне функціонування таких систем потребує складних механізмів оркестрації ресурсів, адаптивного offloading та

інтеграції з мережами 5G/6G, що визначає основні напрями подальших досліджень у сфері AR/VR-мереж.

2.2. Методи оптимізації трафіку

Передача мультимедійних потоків у системах доповненої та віртуальної реальності характеризується надвисокими вимогами до пропускну здатності мережі та стабільності каналу зв'язку. Основним викликом є забезпечення передачі відео з високою роздільною здатністю (4K–8K) при частоті 60–120 FPS у режимі мінімальної затримки. У зв'язку з цим ключову роль відіграють методи оптимізації трафіку, які включають алгоритми стиснення відео, адаптивну потокову передачу та контекстно-залежну оптимізацію даних [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Стиснення відео є базовим елементом зменшення навантаження на мережу в AR/VR-системах. Сучасні кодеки, такі як H.264/AVC, H.265/HEVC та AV1, використовують міжкадрову та внутрішньокадрову компресію, що дозволяє суттєво зменшити обсяг передаваних даних без критичної втрати якості зображення. Зокрема, H.265 забезпечує приблизно 50% зменшення бітрейту порівняно з H.264 при збереженні аналогічної візуальної якості, що є критично важливим для VR-потоків [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Подальший розвиток методів компресії пов'язаний із використанням контент-адаптивного кодування. У цьому підході параметри стиснення динамічно змінюються залежно від складності сцени, руху об'єктів та активності користувача. Наприклад, у сценах із низькою динамікою застосовуються агресивніші алгоритми стиснення, тоді як у швидко змінних сценах пріоритет надається збереженню якості зображення для уникнення артефактів [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Окремим напрямом оптимізації є технологія foveated encoding, яка базується на особливостях людського зору. Відповідно до цієї концепції, висока роздільна здатність передається лише в області фокусування погляду користувача, тоді як периферійні області кодуються з нижчою якістю. Це дозволяє зменшити обсяг трафіку до 30–70% без суттєвого впливу на сприйняття зображення користувачем у VR-середовищі [13]. Адаптивна потокова передача відео є другим ключовим механізмом оптимізації мережевого трафіку. Найпоширенішою технологією в цій області є Dynamic Adaptive Streaming over

HTTP (DASH), яка дозволяє змінювати якість відео в режимі реального часу залежно від пропускної здатності мережі та затримок. У рамках DASH відео розбивається на сегменти з різною якістю, а клієнтський пристрій самостійно обирає оптимальний варіант відтворення.

У контексті AR/VR застосування DASH має специфічні особливості, пов'язані з необхідністю мінімізації затримки. Для цього використовуються low-latency DASH (LL-DASH) та WebRTC-базовані підходи, які забезпечують передачу потоків у режимі майже реального часу. Дослідження показують, що LL-DASH дозволяє зменшити end-to-end latency до 1–2 секунд, що є прийнятним для деяких VR-додатків, однак недостатнім для високоточних інтерактивних систем [7]. Додатковим напрямом є використання прогнозування пропускної здатності каналу зв'язку. Алгоритми машинного навчання застосовуються для передбачення змін мережевих умов і завчасного перемикання між рівнями якості відео. Такий підхід дозволяє зменшити кількість буферизацій та забезпечити більш стабільний користувацький досвід. Важливу роль у оптимізації трафіку відіграє edge computing, який дозволяє виконувати попередню обробку відеопотоків ближче до користувача. Edge-сервери можуть здійснювати транскодування відео, агрегацію потоків та динамічну зміну бітрейту без необхідності звернення до центрального дата-центру. Це значно знижує затримки та навантаження на магістральні мережі [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Гібридні підходи, що поєднують компресію, адаптивну передачу та edge-обробку, вважаються найбільш ефективними для сучасних AR/VR-систем. Наприклад, архітектури edge-assisted streaming дозволяють розподіляти процеси кодування між клієнтом, edge-вузлом і хмарию, забезпечуючи баланс між якістю відео та затримкою передачі.

Окрему увагу дослідники приділяють оптимізації трафіку з точки зору QoS (Quality of Service) та QoE (Quality of Experience). У той час як QoS орієнтований на мережеві параметри (затримка, jitter, пропускна здатність), QoE відображає суб'єктивне сприйняття користувача. У AR/VR-системах саме QoE є визначальним показником, оскільки навіть незначні деградації якості можуть

викликати дискомфорт або втрату ефекту присутності [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Методи оптимізації трафіку в AR/VR-системах формують багаторівневу структуру, що включає алгоритми компресії відео, адаптивну потокову передачу, прогнозування мережевих умов та edge-обробку даних. Їх комплексне застосування дозволяє суттєво знизити вимоги до пропускної здатності мережі та забезпечити стабільну роботу інтерактивних додатків у режимі реального часу.

2.3. Балансування навантаження в мережах AR/VR

Системи доповненої та віртуальної реальності характеризуються високою інтенсивністю мережевого трафіку та значним обсягом обчислювальних операцій, що створює суттєве навантаження на мережеву інфраструктуру, сервери та edge-вузли. У зв'язку з цим балансування навантаження є одним із ключових механізмів забезпечення стабільного функціонування AR/VR-додатків, особливо в умовах великої кількості одночасних користувачів та динамічних змін мережевого середовища [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. У загальному розумінні балансування навантаження являє собою процес розподілу мережевих, обчислювальних та системних ресурсів між декількома вузлами або серверами з метою уникнення перевантаження окремих компонентів системи. У AR/VR-середовищах цей процес має особливе значення через необхідність підтримки ultra-low latency, високої частоти кадрів та синхронізації мультимедійних потоків у режимі реального часу [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Основною проблемою AR/VR-мереж є нерівномірний розподіл навантаження між серверами. Під час одночасного підключення великої кількості користувачів можуть виникати ситуації, за яких окремі edge-вузли або дата-центри перевантажуються, тоді як інші ресурси залишаються недозавантаженими. Це призводить до збільшення затримок, втрати пакетів та деградації якості користувацького досвіду (QoE) [19].

У сучасних AR/VR-системах балансування навантаження реалізується на декількох рівнях: мережевому, серверному та прикладному. Мережевий рівень

передбачає оптимізацію маршрутизації трафіку та розподіл потоків між різними каналами зв'язку. Серверний рівень відповідає за розподіл обчислювальних задач між хмарними та edge-серверами. Прикладний рівень забезпечує адаптацію параметрів сервісу залежно від поточного стану мережі та навантаження на систему. Одним із базових підходів до балансування є статичний розподіл навантаження. У цьому випадку ресурси розподіляються між серверами за заздалегідь визначеними правилами, які не змінюються залежно від поточного стану системи. Найпростішим прикладом є алгоритм Round Robin, у межах якого кожен новий запит послідовно спрямовується на наступний сервер у списку. Такий підхід дозволяє рівномірно розподіляти потік запитів між вузлами мережі без необхідності постійного моніторингу навантаження. Іншим поширеним методом є Weighted Round Robin, де кожному серверу призначається певна вага відповідно до його продуктивності. Сервери з більшою обчислювальною потужністю отримують більшу кількість запитів, що забезпечує більш ефективне використання ресурсів мережі **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Статичні алгоритми характеризуються низькою складністю реалізації та мінімальними витратами процесорного часу, оскільки не потребують постійного аналізу стану системи або передачі службової інформації між вузлами. Саме тому подібні підходи широко використовуються у традиційних веб-сервісах та централізованих хмарних системах із відносно стабільним трафіком. Проте для AR/VR-середовищ ефективність статичного балансування є обмеженою. Це пояснюється тим, що трафік у AR/VR-додатках має динамічний характер і значною мірою залежить від поведінки користувача, складності віртуальної сцени, типу передаваного контенту та кількості одночасно активних клієнтів. Наприклад, під час рендерингу високодеталізованих VR-сцен або багатокористувацьких сесій навантаження на окремі сервери може різко збільшуватися, тоді як інші вузли залишатимуться недовантаженими. Оскільки статичні алгоритми не враховують поточний рівень використання CPU, GPU, пам'яті чи пропускної здатності каналу зв'язку, вони

не здатні оперативно реагувати на зміну навантаження [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Додатковою проблемою є те, що AR/VR-додатки мають надзвичайно жорсткі вимоги до затримки передачі даних. Навіть короткочасне перевантаження сервера може призвести до збільшення latency, втрати кадрів або виникнення jitter, що негативно впливає на якість користувацького досвіду. У системах віртуальної реальності це може проявлятися у вигляді затримки реакції сцени на рухи користувача, зниження плавності зображення та виникнення cybersickness. Саме тому статичні методи балансування здебільшого використовуються лише як базові або допоміжні механізми у великих AR/VR-інфраструктурах [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Більш ефективними для AR/VR є динамічні алгоритми балансування навантаження, які аналізують стан системи в режимі реального часу та приймають рішення на основі актуальних показників роботи мережі й серверів. На відміну від статичних підходів, динамічне балансування враховує кількість активних користувачів, рівень завантаження процесора та графічного прискорювача, обсяг доступної пам'яті, затримку відповіді сервера та параметри мережевого каналу [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Одним із найпоширеніших алгоритмів є Least Connections, принцип роботи якого полягає у спрямуванні нових запитів до сервера з найменшою кількістю активних з'єднань. Такий підхід дозволяє уникати ситуацій, коли окремі вузли стають перевантаженими через надмірну кількість одночасних користувачів. Для AR/VR-систем це особливо важливо, оскільки кожне з'єднання може генерувати значний мультимедійний трафік та вимагати великої кількості GPU-ресурсів для рендерингу тривимірного контенту [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Іншим поширеним методом є Least Response Time, який враховує не лише кількість активних підключень, а й швидкість відповіді сервера. У цьому випадку запити перенаправляються до вузлів із мінімальною затримкою обробки. Такий підхід є більш ефективним у мережах AR/VR, оскільки дозволяє враховувати поточний стан як серверної інфраструктури, так і

мережевих каналів. Якщо певний сервер демонструє збільшення часу відповіді через перевантаження або проблеми з мережею, система автоматично перенаправляє трафік до інших вузлів [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

У сучасних AR/VR-платформах також застосовуються адаптивні алгоритми балансування (Adaptive Load Balancing), які використовують прогнозування навантаження та елементи штучного інтелекту. Подібні системи аналізують історичні дані, поведінку користувачів та мережеві параметри для передбачення майбутнього навантаження на сервери. Наприклад, під час масових багатокористувацьких VR-подій система може заздалегідь активувати додаткові edge-вузли або змінювати маршрутизацію трафіку для уникнення перевантаження мережі. Використання AI-алгоритмів дозволяє значно скоротити час реакції системи та підвищити стабільність роботи сервісів у режимі реального часу [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. У системах edge computing балансування навантаження ускладнюється обмеженістю ресурсів edge-вузлів. На відміну від великих хмарних дата-центрів, edge-сервери розташовуються поблизу користувачів і мають суттєво менші обчислювальні можливості, обмежений обсяг оперативної пам'яті та нижчу продуктивність GPU-систем. Водночас саме edge-вузли виконують критично важливі для AR/VR задачі, пов'язані з обробкою сенсорних даних, локальним рендерингом, передаванням відеопотоків та підтримкою ultra-low latency. Через обмеженість ресурсів edge-серверів виникає необхідність постійного контролю навантаження та динамічного розподілу задач між edge-вузлами і центральною хмарою. Якщо edge-сервер перевантажується, частина обчислень може переноситися до іншого периферійного вузла або у хмарний дата-центр. Такий процес отримав назву service migration або workload migration. Його основною метою є підтримка стабільної якості сервісу без суттєвого збільшення затримки передачі даних. Механізми міграції сервісів є особливо важливими для мобільних AR/VR-сценаріїв. Наприклад, користувач із AR-окулярами може переміщуватися між зонами покриття різних базових станцій 5G. У такому

випадку система повинна заздалегідь перенести обчислювальні процеси до нового edge-вузла, який знаходиться ближче до користувача. Якщо міграція виконується із затримкою або некоректно, це може призвести до втрати пакетів, розриву з'єднання або погіршення якості візуалізації **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Додаткову складність створює необхідність одночасного врахування мережевих та обчислювальних параметрів. У процесі балансування система повинна оцінювати не лише завантаження серверів, але й пропускну здатність каналів зв'язку, рівень jitter, затримку передачі пакетів та географічне розташування користувача. Саме тому сучасні edge-oriented AR/VR-платформи використовують комплексні системи оркестрації ресурсів, які поєднують механізми SDN, NFV та AI-керування мережею.

У дослідженні **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]** демонструють, що використання AI-алгоритмів дозволяє суттєво підвищити ефективність балансування навантаження в AR/VR-мережах. Зокрема, методи машинного навчання застосовуються для прогнозування навантаження на сервери, передбачення поведінки користувачів та автоматичної адаптації маршрутизації трафіку. Перспективним напрямом є використання Software-Defined Networking (SDN) та Network Function Virtualization (NFV). SDN забезпечує централізоване управління мережевими потоками шляхом програмного контролю маршрутизаторів та комутаторів, тоді як NFV дозволяє віртуалізувати мережеві функції та динамічно масштабувати ресурси залежно від навантаження. У AR/VR-системах поєднання SDN та NFV дозволяє швидко адаптувати мережу до змін інтенсивності трафіку та забезпечувати стабільність роботи сервісів.

Важливим аспектом балансування є підтримка мобільності користувачів. У мобільних AR/VR-сценаріях користувач може переміщуватися між різними зонами покриття, що вимагає безперервної передачі сервісу між edge-вузлами без розриву з'єднання. Для цього використовуються механізми seamless handover та predictive migration, які дозволяють заздалегідь переносити обчислювальні процеси до нового edge-сервера **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Крім того, балансування навантаження тісно пов'язане з питаннями енергоефективності. Постійне використання високопродуктивних серверів та GPU-систем супроводжується значним енергоспоживанням, тому сучасні алгоритми прагнуть забезпечити компроміс між продуктивністю та енергоефективністю. Для цього застосовуються *adaptive resource allocation* та *energy-aware scheduling* [8]. Балансування навантаження є критично важливим компонентом мережевої інфраструктури AR/VR-систем. Сучасні підходи поєднують динамічний розподіл ресурсів, *edge computing*, AI-алгоритми та SDN/NFV-технології для забезпечення стабільної роботи сервісів у режимі реального часу. Подальший розвиток методів балансування пов'язаний із інтеграцією технологій 5G/6G, автоматизацією керування мережею та використанням інтелектуальних механізмів прогнозування навантаження.

2.4. Питання кібербезпеки в AR/VR-мережах

Розвиток технологій доповненої та віртуальної реальності супроводжується суттєвим зростанням вимог до захисту інформації та безпеки мережевої інфраструктури. AR/VR-системи інтегрують велику кількість сенсорів, камер, мікрофонів, біометричних пристроїв та мережевих сервісів, що забезпечують безперервний збір, передавання та обробку даних у режимі реального часу. У результаті формуються нові вектори атак, які можуть впливати не лише на інформаційні ресурси, але й безпосередньо на користувача та його фізичне сприйняття віртуального середовища [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Однією з основних особливостей AR/VR-систем є значний обсяг персональних та біометричних даних, які обробляються під час роботи додатків. Гарнітури VR та AR-окуляри здатні збирати інформацію про рухи голови, положення очей, жести, голосові команди, параметри навколишнього середовища та навіть фізіологічні реакції користувача. Подібні дані можуть використовуватися для ідентифікації особи, аналізу поведінки або створення цифрового профілю користувача. У разі компрометації таких даних виникає ризик порушення конфіденційності та незаконного використання персональної

інформації **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. На відміну від традиційних комп'ютерних систем, AR/VR-мережі мають складну багаторівневу архітектуру, яка включає клієнтські пристрої, edge-вузли, хмарні сервери, системи потокової передачі даних та бездротові канали зв'язку. Кожен із цих компонентів може стати ціллю кіберзлочинців. Особливу небезпеку становлять атаки на канали передачі даних, оскільки AR/VR-додатки значною мірою залежать від безперервності мережевого з'єднання та стабільності потокового відео **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Одним із найбільш поширених типів загроз є атаки типу Denial of Service (DoS) та Distributed Denial of Service (DDoS). Їх основною метою є створення надмірного навантаження на сервери, edge-вузли або канали зв'язку шляхом генерування великої кількості запитів чи мережевих пакетів. У результаті обчислювальні та мережеві ресурси системи виснажуються, через що легітимні користувачі не можуть отримати доступ до сервісу або стикаються зі значним погіршенням його роботи. Якщо у випадку DoS-атак перевантаження зазвичай здійснюється з одного джерела, то DDoS-атаки використовують одночасно велику кількість пристроїв, часто об'єднаних у botnet-мережі. Це значно ускладнює процес фільтрації шкідливого трафіку та підвищує ефективність атаки **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Для AR/VR-систем подібні атаки становлять особливу небезпеку через високі вимоги до затримки передачі даних та стабільності мережевого з'єднання. На відміну від звичайних веб-сервісів, AR/VR-додатки функціонують у режимі реального часу та потребують безперервної синхронізації між рухами користувача, сенсорними даними та відображенням віртуального середовища. Навіть короточасне перевантаження мережі може спричинити різке зростання latency, втрату пакетів або нестабільність відеопотоку. У VR-середовищі це проявляється у вигляді затримки реакції сцени на рухи користувача, зниження плавності анімації та порушення просторової синхронізації **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. Крім технічних наслідків, DDoS-атаки можуть безпосередньо впливати на фізичний стан користувача. Через порушення синхронізації між

візуальним контентом та рухами людини виникає ефект cybersickness, який супроводжується запамороченням, нудотою, дезорієнтацією та втратою координації. У критичних сценаріях, наприклад у медичних VR-тренажерах, військових симуляторах або системах дистанційного керування, подібні порушення можуть призводити до помилкових дій оператора та створювати реальну загрозу безпеці [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Додатковою проблемою є те, що сучасні AR/VR-платформи активно використовують edge computing та хмарні сервіси, через що атаки можуть бути спрямовані не лише на центральні сервери, але й на edge-вузли, які забезпечують локальний рендеринг і потокову передачу даних. Оскільки edge-сервери мають обмежені ресурси порівняно з дата-центрами, вони є більш вразливими до перевантаження. У результаті навіть локальна атака на окремий edge-вузол може спричинити деградацію сервісу для великої кількості користувачів у певному регіоні [16]. Суттєву загрозу становлять атаки типу Man-in-the-Middle (MitM), під час яких зломисник перехоплює, аналізує або модифікує мережевий трафік між клієнтським пристроєм та сервером. У класичному сценарії MitM-атаки зломисник займає проміжне положення між двома сторонами комунікації, створюючи ілюзію прямого з'єднання. У результаті користувач і сервер можуть навіть не підозрювати про факт перехоплення даних [15]. У контексті AR/VR-систем MitM-атаки є особливо небезпечними через великий обсяг мультимедійного трафіку та постійну передачу сенсорних даних. Зломисник може не лише перехоплювати персональну інформацію, але й змінювати сам віртуальний контент. Наприклад, під час потокової передачі VR-відео можлива підміна окремих фрагментів сцени, спотворення тривимірних моделей або зміна координат об'єктів у просторі. Подібне втручання може порушити орієнтацію користувача у віртуальному середовищі та призвести до неправильного сприйняття інформації [15]. Особливу небезпеку MitM-атаки становлять у спеціалізованих AR/VR-системах. У медичних AR-додатках підміна візуальної інформації може спричинити помилки під час проведення операцій або діагностики. У

військових системах доповненої реальності викривлення тактичної інформації може впливати на прийняття рішень оператором. У промислових AR-комплексах зміна координат об'єктів або інструкцій здатна створити аварійні ситуації на виробництві [15]. Крім модифікації контенту, MitM-атаки часто використовуються для викрадення облікових даних, токенів автентифікації або конфіденційної інформації користувача. Оскільки AR/VR-пристрої збирають біометричні та поведінкові дані, компрометація такого трафіку може призвести до витоку особливо чутливої інформації. Саме тому сучасні AR/VR-платформи активно використовують TLS-шифрування, VPN-з'єднання та механізми взаємної автентифікації між клієнтом і сервером.

Дослідники також виділяють загрозу spoofing-атак, під час яких зломисник підміняє ідентифікаційні дані користувача, пристрою або мережевого вузла з метою отримання несанкціонованого доступу до системи. Подібні атаки можуть реалізовуватися шляхом фальсифікації IP-адрес, MAC-адрес, токенів автентифікації або цифрових сертифікатів **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. У AR/VR-системах spoofing-атаки є особливо небезпечними через активне використання сенсорних пристроїв та механізмів просторового позиціонування. Зломисник може підробляти інформацію про координати користувача, рухи голови, жести або положення об'єктів у просторі. У результаті система отримує викривлені дані, що може спричинити неправильне відображення віртуального середовища або порушення роботи AR-навігації **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**. У багатокористувацьких VR-платформах spoofing може використовуватися для імітації іншого користувача або створення фальшивих віртуальних об'єктів. Це створює ризики несанкціонованого доступу до корпоративних середовищ, викрадення цифрових ресурсів або порушення роботи спільних VR-сесій. Особливо критичною є можливість підробки біометричних даних, оскільки сучасні VR-системи дедалі частіше використовують eye-tracking, аналіз голосу та поведінкову автентифікацію **[Ошибка! Источник ссылки не найден.]**.

Окрему проблему становить spoofing сенсорних даних у AR-системах, які використовуються для навігації або взаємодії з фізичними об'єктами. Наприклад, підміна координат GPS або даних комп'ютерного бачення може спричинити неправильне позиціонування віртуальних елементів у реальному просторі. У промислових або транспортних системах це може призвести до серйозних помилок під час експлуатації обладнання [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Через широке використання IoT-пристроїв та edge computing AR/VR-мережі стають вразливими до атак на периферійні вузли. Edge-сервери виконують функції локальної обробки даних, рендерингу сцен, кешування контенту та управління потоковими сервісами. Їх основною перевагою є зменшення затримки передачі даних завдяки наближенню обчислювальних ресурсів до користувача. Проте розподілена природа edge computing створює додаткові ризики безпеки [16]. На відміну від централізованих дата-центрів, edge-вузли часто розташовуються у менш захищених середовищах, наприклад поблизу базових станцій мобільного зв'язку або локальних мережевих інфраструктур. Це підвищує ризик фізичного доступу до обладнання або компрометації периферійних серверів. Крім того, edge-системи зазвичай мають обмежені ресурси, тому реалізація складних механізмів захисту може бути ускладненою [16].

У разі компрометації edge-вузла зломисник може отримати доступ до локального мережевого трафіку, кешованих мультимедійних потоків та персональних даних користувачів. Оскільки edge-сервери обробляють інформацію в режимі реального часу, атака на них може призвести до масового порушення роботи AR/VR-сервісів у певному регіоні. Додаткову небезпеку становить можливість модифікації контенту або втручання у процес рендерингу віртуального середовища [16].

Окрему увагу приділяють питанням безпеки бездротових мереж, зокрема Wi-Fi 6, 5G та перспективних 6G-систем, які активно використовуються для підтримки AR/VR-додатків. Саме бездротові канали забезпечують передачу великих обсягів мультимедійного трафіку між користувачами, edge-вузлами та

хмарними сервісами. Через це стабільність та захищеність бездротового з'єднання безпосередньо впливають на якість функціонування AR/VR-систем. Незважаючи на використання сучасних механізмів шифрування, бездротові мережі залишаються вразливими до перехоплення трафіку, атак на процедури автентифікації та глушіння сигналу. Наприклад, під час jamming-атак зломисник створює радіочастотні перешкоди, що унеможливають стабільну передачу даних між клієнтським пристроєм та мережею. Для AR/VR-додатків навіть короточасне погіршення якості сигналу може призвести до збільшення затримки, втрати кадрів та порушення синхронізації відеопотоку. Особливо важливими питання безпеки є для 5G- та 6G-мереж, які активно інтегруються з edge computing та network slicing. Використання virtualized network functions та SDN-технологій підвищує гнучкість мережі, однак одночасно створює нові вектори атак. Компрометація окремого network slice або SDN-контролера може впливати на роботу великої кількості AR/VR-сервісів одночасно.

Крім того, бездротові мережі є вразливими до атак replay та session hijacking, під час яких зломисник повторно використовує перехоплені пакети або перехоплює активну сесію користувача. У AR/VR-системах це може призводити до несанкціонованого доступу до віртуального середовища або втручання у роботу багатокористувацьких платформ. Саме тому сучасні AR/VR-мережі потребують комплексного використання криптографічних протоколів, механізмів виявлення вторгнень та AI-систем моніторингу безпеки [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ ДЛЯ ПІДТРИМКИ AR/VR-ДОДАТКУ

3.1. Постановка задачі моделювання

Метою моделювання є дослідження особливостей функціонування комп'ютерної мережі для підтримки AR/VR-додатку та аналіз впливу мережевих параметрів на якість його роботи. Для проведення дослідження необхідно побудувати мережеву модель у середовищі Cisco Packet Tracer, змодельовати характерний AR/VR-трафік та оцінити ефективність передачі даних за різних умов функціонування мережі. У якості досліджуваного сценарію обрано багатокористувацький VR-додаток, у якому декілька користувачів одночасно взаємодіють у спільному віртуальному середовищі. Подібні рішення широко використовуються в освітніх платформах, тренажерах, системах віддаленої співпраці та комп'ютерних іграх. Особливістю такого сценарію є необхідність постійного обміну даними між клієнтськими пристроями та центральним сервером для забезпечення синхронізації дій користувачів і передачі мультимедійного контенту.

Для моделювання передбачається використання трьох клієнтських пристроїв, які імітують VR-гарнітури, сервера обробки даних, комутатора, маршрутизатора та каналу доступу до Інтернету. Передача даних між елементами мережі здійснюється за клієнт-серверною архітектурою. Така структура дозволяє централізовано керувати обміном інформацією та відповідає принципам роботи більшості сучасних AR/VR-платформ. Важливим етапом постановки задачі є визначення основних мережевих параметрів, які будуть досліджуватися в процесі моделювання. До таких параметрів належать пропускна здатність каналу зв'язку, затримка передачі даних та кількість одночасно підключених клієнтів. Для проведення експериментів пропускна здатність каналу буде змінюватися в межах від 10 до 500 Мбіт/с, а затримка передачі – від 10 до 200 мс. Кількість клієнтів у базовому сценарії становить три пристрої, що дозволяє змодельовати типове навантаження багатокористувацького VR-середовища.

Основними показниками оцінювання ефективності мережі є середня затримка передачі пакетів, рівень втрати пакетів, завантаження каналу зв'язку та загальна якість роботи додатку. Аналіз цих характеристик дозволяє визначити критичні значення параметрів мережі та оцінити можливість забезпечення комфортної роботи користувачів у середовищі віртуальної реальності.

3.2 Вибір програмного середовища для моделювання

Сучасні додатки доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR) висувають надзвичайно високі вимоги до телекомунікаційної інфраструктури. Вони потребують передачі великих обсягів даних у реальному часі, зокрема високоякісного потокового відео, інформації про позиціонування користувачів, просторового аудіо та синхронізації дій у спільному віртуальному середовищі. Для ефективного дослідження, тестування та оптимізації мережевих умов роботи таких систем необхідні спеціалізовані інструменти комп'ютерного моделювання. Вибір програмного середовища є ключовим початковим етапом практичної роботи, оскільки саме від нього залежить точність імітації, реалістичність результатів та можливість всебічного аналізу AR/VR-трафіку [3].

Основними критеріями вибору програмного забезпечення для моделювання мереж підтримки AR/VR-додатків є: рівень реалізму імітації, підтримка протоколів UDP/TCP, можливість моделювання QoS, аналіз затримки (latency), втрат пакетів та пропускної здатності, наявність графічного інтерфейсу для візуалізації, інтеграція з потоковим відео, обчислювальні вимоги, доступність для навчального процесу та відповідність методичним вимогам спеціальності «Комп'ютерні науки».

Серед найбільш поширених інструментів розглядаються такі аналоги:

Cisco Packet Tracer – симулятор мереж від компанії Cisco Systems, орієнтований на освітні цілі. Програма дозволяє швидко створювати топології з клієнтськими пристроями (VR-гарнітури), серверами, маршрутизаторами,

комутаторами та інтернет-каналами. Має режим симуляції (Simulation mode) для візуального відстеження руху пакетів у реальному часі, підтримку TCP/UDP, базові інструменти QoS та моніторингу трафіку. Перевагами є інтуїтивність, низьке споживання ресурсів та широке використання в українських навчальних закладах.

GNS3 (Graphical Network Simulator-3) – потужний емулятор, що підтримує реальні образи мережевого обладнання (Cisco IOS, Juniper тощо). Дозволяє інтегрувати віртуальні машини та підключатися до реального інтернету. Підходить для складних сценаріїв, але вимагає значних обчислювальних ресурсів і має вищу складність освоєння.

NS-3 (Network Simulator 3) – відкритий дискретно-подійний симулятор, який забезпечує найвищий рівень точності моделювання. Використовується для наукових досліджень AR/VR-трафіку, зокрема bursty traffic і потокового відео. Підтримує програмування на C++ та Python, детальну статистику пакетів, але вимагає значних навичків кодування та не має зручного графічного інтерфейсу для початківців.

Mininet – емулятор SDN-мереж на базі Linux-контейнерів. Ідеально підходить для швидкого тестування Software-Defined Networking, запуску реальних додатків та контролерів OpenFlow. Відрізняється низьким споживанням ресурсів і високою реалістичністю для SDN-сценаріїв, але обмежений у візуалізації складних топологій.

OMNeT++ – модульний симулятор з розширеними бібліотеками для телекомунікаційних мереж. Підтримує комплексний аналіз QoS, багатосерверні системи та імітацію реального часу. Має високу гнучкість, але характеризується крутою кривою навчання та необхідністю написання коду.

Unity з мережевими модулями (наприклад, Mirror, Photon, Netcode for GameObjects) – ігровий движок, орієнтований на розробку самого AR/VR-додатку. Дозволяє інтегрувати мережеву логіку безпосередньо в додаток, тестувати енд-to-енд взаємодію, але значно поступається спеціалізованим мережевим симуляторам у глибині аналізу інфраструктури та QoS-параметрів.

Для наочного порівняння основних аналогів складено таблицю.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика програмних середовищ для моделювання мереж

Програмне середовище	Рівень реалізму	Легкість використання	Підтримка AR/VR-трафіку	Обчислювальні вимоги	Відкритість коду	Рекомендація для навчання
Cisco Packet Tracer	Середній	Висока	Хороша (візуальна)	Низькі	Закритий	Відмінна
GNS3	Високий	Середня	Хороша	Високі	Відкритий	Хороша
NS-3	Дуже високий	Середня	Відмінна	Середні	Відкритий	Для досліджень
Mininet	Високий	Середня	Хороша (SDN)	Низькі	Відкритий	Для SDN
OMNeT++	Високий	Низька	Хороша	Середні	Відкритий	Для складних моделей
Unity + мережеві модулі	Середній	Висока (для розробки)	Відмінна (всередині додатку)	Високі	Залежить	Для розробки додатків

У даній практичній роботі як основне програмне середовище обрано Cisco Packet Tracer. Це рішення забезпечує оптимальне поєднання доступності, візуальної наочності та функціональних можливостей для виконання всіх

завдань: розробки топології, моделювання AR/VR-навантаження, дослідження впливу затримки та пропускної здатності, а також реалізації механізмів QoS [4].

Програма дозволяє ефективно імітувати реальні умови роботи VR-гарнітур, підключених через комутатори та маршрутизатори до сервера обробки даних. У режимі симуляції можна безпосередньо спостерігати передачу пакетів, вимірювати затримку, втрати та навантаження на канал. Cisco Packet Tracer підтримує необхідні інструменти для пріоритезації трафіку та аналізу Quality of Experience, що критично важливо для AR/VR-додатків.

Вибір Cisco Packet Tracer також зумовлений його широким застосуванням у вищих навчальних закладах України, безкоштовним доступом для освітніх цілей та відповідністю методичним рекомендаціям спеціальності «Комп'ютерні науки» [1]. Це забезпечує можливість відтворення результатів іншими студентами та інтеграцію з існуючими навчальними матеріалами.

Cisco Packet Tracer є найбільш раціональним вибором для практичного моделювання мережі підтримки AR/VR-додатку в рамках навчальної роботи. Він дозволяє повноцінно реалізувати всі етапи дослідження, поєднуючи простоту використання з достатньою глибиною аналізу мережевих процесів.

3.3 Розробка топології мережі

Ефективна підтримка AR/VR-додатків неможлива без ретельно спроектованої мережевої топології, яка забезпечує надійну передачу даних у реальному часі з мінімальною затримкою. Топологія повинна враховувати високі вимоги до пропускної здатності, стабільності з'єднання та пріоритезації трафіку. У даній практичній роботі розробка топології мережі виконана в середовищі Cisco Packet Tracer, що дозволяє візуально змодельовати всі ключові компоненти та імітувати їх взаємодію [3].

Основними елементами топології є:

- Клієнтські пристрої (VR-гарнітури). Для моделювання обрано три VR-гарнітури, підключені як кінцеві пристрої (End Devices). Кожен клієнт імітує передачу потокового відео високої роздільної здатності (HD/4K),

даних про позиціонування (head tracking) та синхронізацію з сервером. VR-гарнітури підключені через дротові або бездротові інтерфейси (Ethernet або Wi-Fi) для забезпечення стабільного з'єднання з низькою затримкою.

- Сервер обробки даних. Центральним елементом є потужний сервер (Server-PT), який відповідає за обробку вхідних даних від VR-клієнтів, рендеринг віртуального середовища, синхронізацію стану сесії та повернення оновленого контенту. Сервер підключено до локальної мережі через гігабітний інтерфейс для забезпечення високої пропускної здатності.
- Маршрутизатори та комутатори. Топологія включає два рівні комутації: • Access-комутатор (Switch 2960) для підключення VR-гарнітур. • Distribution-рівень з маршрутизатором (Router 4331 або 2811), який виконує функції маршрутизації між локальною мережею та зовнішнім каналом. Це дозволяє сегментувати трафік, застосовувати механізми QoS та забезпечувати масштабованість.
- Канал доступу до Інтернету. Для моделювання зовнішнього з'єднання використано хмарний об'єкт (Cloud-PT) або ISP-маршрутизатор, що імітує вихід у глобальну мережу. Параметри каналу налаштовані з можливістю варіювання затримки (latency 20–150 мс) та пропускної здатності (від 10 Мбіт/с до 1 Гбіт/с) для проведення експериментів.

Розроблена топологія має зіркоподібну (star) структуру з елементами ієрархічної моделі. VR-гарнітури підключаються до access-комутатора, який агрегує трафік і передає його на маршрутизатор. Маршрутизатор забезпечує маршрутизацію до сервера та зовнішнього каналу. Така архітектура відповідає сучасним рекомендаціям для мереж реального часу та дозволяє ефективно моделювати навантаження AR/VR-трафіку [4].

Таблиця 3.2 – Складові елементи розробленої топології мережі

№	Компонент	Кількість	Модель у Packet Tracer	IP-адресація (приклад)	Основні функції
1	VR-гарнітури (клієнти)	3	PC-PT або Laptop-PT	192.168.1.10–12	Генерація AR/VR-трафіку, head-tracking, відображення відео
2	Сервер обробки даних	1	Server-PT	192.168.1.100	Обробка даних, рендеринг, синхронізація
3	Access-комутатор	1	2960	–	Агрегація клієнтського трафіку
4	Маршрутизатор	1	4331 / 2811	192.168.1.1 / 10.0.0.1	Маршрутизація, QoS, NAT
5	Канал доступу до Інтернету	1	Cloud-PT / ISP Router	10.0.0.2	Імітація зовнішнього з'єднання

Для візуального представлення розробленої топології наведено схему, створену в Cisco Packet Tracer.

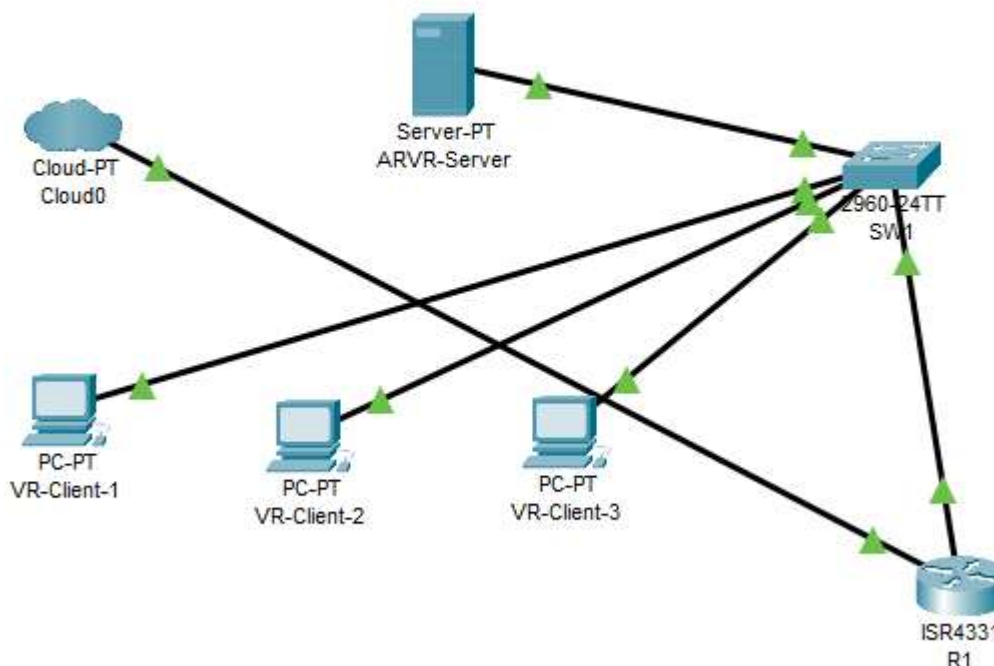


Рисунок 3.1 – Топологія мережі для підтримки AR/VR-додатку в Cisco Packet Tracer

У розробленій топології реалізовано базову конфігурацію:

- Призначення IP-адрес та масок підмереж.
- Налаштування статичної маршрутизації.
- Увімкнення протоколів TCP/UDP для імітації різного типу трафіку.
- Підготовка портів для подальшого застосування механізмів QoS (priority queuing, bandwidth limiting).

Така топологія забезпечує можливість проведення всіх наступних етапів практичної роботи: моделювання навантаження, вимірювання затримки, аналіз втрат пакетів та тестування QoS. Вона є достатньо гнучкою для масштабування (додавання нових клієнтів) та модифікації параметрів каналу [1].

Розробка топології в Cisco Packet Tracer дозволила поєднати теоретичні знання з практичною реалізацією, що є важливим для формування компетентностей у сфері комп'ютерних мереж та підтримки сучасних мультимедійних систем.

3.4 Моделювання навантаження AR/VR-трафіку

Моделювання навантаження є ключовим етапом оцінки працездатності мережі для підтримки AR/VR-додатків. AR/VR-трафік характеризується високою інтенсивністю, варіабельністю (bursty nature) та жорсткими вимогами до затримки. У середовищі Cisco Packet Tracer проведено імітацію характерного навантаження, що включає потокову передачу відео, синхронізацію позицій користувачів та аналіз протоколів передачі даних [3].

Потокова передача відео. Для імітації високоякісного відео (HD/4K) у VR-гарнітурах використано вбудований інструмент Packet Tracer – Application Simulation з налаштуванням HTTP-сервера або RTP-подібного трафіку. Кожен VR-клієнт генерував постійний потік даних обсягом 15–50 Мбіт/с залежно від роздільної здатності. У режимі симуляції спостерігався безперервний обмін пакетами між VR-гарнітурами та сервером обробки даних. Такий трафік є найбільш ресурсоємним компонентом і вимагає стабільної пропускної здатності для уникнення буферизації та артефактів зображення.

Синхронізація позицій користувачів. Для моделювання head-tracking та hand-tracking даних імітувався регулярний обмін невеликими пакетами (100–500 байт) з високою частотою (60–90 Гц). Ці дані передавалися від клієнтських пристроїв до сервера для оновлення спільного віртуального середовища. У Packet Tracer це реалізовано через налаштування постійних UDP-сесій з низьким розміром корисного навантаження. Такий тип трафіку є чутливим до затримки: навіть невелике збільшення latency призводить до десинхронізації та погіршення користувацького досвіду.

Аналіз використання UDP/TCP. У рамках моделювання проведено порівняльний аналіз протоколів передачі:

- TCP використовувався для надійної передачі потокового відео та контрольних даних. Перевагою є гарантована доставка пакетів і механізми відновлення, але недоліком – додаткові затримки через підтвердження (ACK) та повторну передачу втрачених пакетів.

- UDP застосовувався для синхронізації позицій та частини відео-поток (RTP/RTCP). Протокол забезпечує мінімальну затримку та низьке навантаження на мережу, але не гарантує доставку, що вимагає додаткових механізмів корекції на рівні додатку.

У Cisco Packet Tracer трафік генерувався за допомогою інструментів PDU (Protocol Data Units) та Application Traffic. У режимі Simulation Mode фіксувалися параметри кожного пакета: розмір, час передачі, шлях проходження через комутатор та маршрутизатор.

Таблиця 3.3 – Характеристики AR/VR-трафіку в моделюванні

Тип трафіку	Протокол	Середній розмір пакета	Частота генерації	Вимоги до мережі	Основне навантаження
Потокова передача відео	TCP/UDP (RTP)	1000–1500 байт	Постійна (15–50 Мбіт/с)	Висока пропускна здатність	Основне
Синхронізація позицій	UDP	100–500 байт	60–90 Гц	Низька затримка (<20 мс)	Критичне
Контрольні дані / команди	TCP	200–600 байт	Нерегулярна	Надійність доставки	Допоміжне

Результати моделювання показали, що сумарне навантаження від трьох VR-клієнтів може сягати 80–120 Мбіт/с у пікові моменти. Переважне використання UDP для часово-критичних даних дозволяє значно знизити загальну затримку, тоді як TCP забезпечує стабільність для відео-поток. Аналіз у Packet Tracer підтвердив, що при недостатній пропускній здатності каналу спостерігається збільшення черг пакетів на маршрутизаторі та зростання рівня втрат [4].

Таке моделювання дозволяє чітко візуалізувати поведінку мережі під AR/VR-навантаженням і підготувати ґрунт для подальшого дослідження впливу

затримки та реалізації QoS. Використання Cisco Packet Tracer забезпечило наочність процесу та можливість багаторазового повторення сценаріїв з різними параметрами.

3.5 Дослідження впливу затримки та пропускної здатності на якість роботи AR/VR

Дослідження впливу мережевих параметрів на якість роботи AR/VR-додатків є центральним етапом практичної роботи. AR/VR-системи надзвичайно чутливі до затримки передачі (latency), пропускної здатності каналу та рівня втрат пакетів. Навіть незначні відхилення від оптимальних значень призводять до погіршення Quality of Experience (QoE): появи артефактів зображення, «морської хвороби», десинхронізації дій користувачів та зниження загальної ефективності додатку [4].

У середовищі Cisco Packet Tracer проведено серію експериментів з варіюванням параметрів каналу доступу до Інтернету. Базова конфігурація топології включала три VR-клієнти, сервер обробки даних, access-комутатор та маршрутизатор. Для імітації зовнішнього каналу використовувався об'єкт Cloud-PT з можливістю налаштування затримки, пропускної здатності та втрати пакетів.

Варіювання параметрів каналу. Експерименти проводилися у кілька етапів. Пропускна здатність каналу змінювалася в діапазоні від 10 Мбіт/с (низька) до 100 Мбіт/с (середня) та 500 Мбіт/с (висока). Затримка варіювалася від 10 мс (ідеальні умови) до 50 мс, 100 мс та 200 мс. Для кожного сценарію фіксувалося сумарне навантаження AR/VR-трафіку (відео + синхронізація позицій).

Вимірювання затримки. У режимі Simulation Mode Cisco Packet Tracer здійснювалося точне вимірювання кінцевої затримки (end-to-end latency) для різних типів пакетів. Середні значення затримки фіксувалися за допомогою інструментів Complex PDU та Time Window. Для потокового відео оптимальною вважається затримка до 30–50 мс. При перевищенні 100 мс

спостерігалось значне погіршення плавності зображення. Для синхронізації позицій критичним порогом є 20 мс – перевищення цього значення призводить до помітної десинхронізації.

Аналіз втрати пакетів. Рівень packet loss варіювався шляхом налаштування параметрів каналу (0 %, 1 %, 3 %, 5 %). Втрати пакетів особливо критичні для UDP-трафіку синхронізації, оскільки не відбувається повторної передачі. У Packet Tracer аналіз проводився шляхом підрахунку втрачених PDU та спостереження за чергами на інтерфейсах маршрутизатора.

Таблиця 3.4 – Результати дослідження впливу мережевих параметрів

Пропускна здатність	Затримка (мс)	Втрата пакетів (%)	Середня затримка відео (мс)	Якість синхронізації	Загальна QoE (оцінка)
10 Мбіт/с	150	5	245	Критична десинхронізація	Неприйнятна
50 Мбіт/с	80	2	95	Помітні затримки	Задовільна
100 Мбіт/с	40	1	48	Стабільна	Хороша
500 Мбіт/с	15	0	18	Відмінна	Відмінна

Результати експериментів свідчать, що при пропускній здатності нижче 50 Мбіт/с та затримці понад 80 мс якість роботи AR/VR-додатку суттєво погіршується. Зростання втрат пакетів понад 2 % призводить до частого появи артефактів у відео-поточі та втрати точності позиціонування. Оптимальними умовами для комфортної роботи є затримка до 30 мс, пропускна здатність від 100 Мбіт/с та рівень втрат пакетів менше 1 %.

Аналіз показав, що потокова передача відео найбільше страждає від недостатньої пропускну здатності, тоді як синхронізація позицій користувачів – від високої затримки. У режимі реального часу Cisco Packet Tracer дозволив візуально спостерігати накопичення черг пакетів на маршрутизаторі та їх вплив на загальну продуктивність системи.

Отримані дані підтверджують необхідність застосування механізмів Quality of Service для пріоритезації AR/VR-трафіку в реальних мережах. Дослідження демонструє пряму залежність між мережевими характеристиками та користувацьким досвідом, що має важливе практичне значення для проектування інфраструктури підтримки AR/VR-додатків [3].

Проведене моделювання дозволило кількісно оцінити межі працездатності мережі та визначити критичні порогові значення параметрів для забезпечення високої якості роботи AR/VR-систем.

3.6 Реалізація механізмів QoS

Реалізація механізмів Quality of Service (QoS) є необхідною умовою для забезпечення стабільної роботи AR/VR-додатків у мережах з обмеженими ресурсами. QoS дозволяє пріоритезувати критичний трафік, обмежувати смугу пропускання для менш важливих потоків та мінімізувати вплив конкуренції за ресурси. У середовищі Cisco Packet Tracer механізми QoS були налаштовані на маршрутизаторі для оптимізації передачі AR/VR-даних [10].

Пріоритезація трафіку. Для пріоритезації використано метод Priority Queuing (PQ) та Class-Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ). Трафік класифікувався за такими ознаками:

- Високий пріоритет (Expedited Forwarding) – UDP-пакети синхронізації позицій користувачів (DSCP EF, 46).
- Середній пріоритет – RTP-потоки відео (DSCP AF41).
- Низький пріоритет – звичайний background-трафік (наприклад, HTTP).

Налаштування проводилося через CLI маршрутизатора: створення class-map, policy-map та застосування service-policy на вихідному інтерфейсі. У режимі Simulation Mode Packet Tracer чітко демонструє, як високопріоритетні пакети обганяють інші в чергах, що суттєво знижує їх затримку.

Обмеження смуги пропускання. Для запобігання перевантаженню каналу застосовано механізми Traffic Policing та Traffic Shaping. Політика обмежувала смугу для non-AR/VR трафіку до 20–30 % від загальної пропускну здатності

каналу. Для відео-потoku встановлено гарантовану смугу 40 Мбіт/с з можливістю burst. Обмеження реалізоване через rate-limit та policer у policy-map. Це дозволило захистити критичні AR/VR-потoki від впливу конкурентного навантаження.

Аналіз ефективності оптимізації. Для оцінки ефективності проведено порівняльні експерименти «до» та «після» впровадження QoS при однакових умовах навантаження (три VR-клієнти, сумарний трафік ~80 Мбіт/с). Вимірювання здійснювалося за допомогою інструментів Packet Tracer (Simulation Mode, PDU capture, interface statistics).

Таблиця 3.5 – Порівняння параметрів мережі до та після впровадження QoS

Параметр	Без QoS	З QoS	Поліпшення
Середня затримка синхронізації	85 мс	22 мс	Зниження на 74 %
Середня затримка відео	110 мс	35 мс	Зниження на 68 %
Рівень втрати пакетів	4,2 %	0,6 %	Зниження в 7 разів
Максимальне навантаження каналу	98 % (перевантаження)	72 %	Стабільність підвищена
Загальна QoE	Задовільна / низька	Хороша / відмінна	Значне покращення

Результати демонструють високу ефективність механізмів QoS. Пріоритезація забезпечила дотримання жорстких вимог до затримки для синхронізації позицій, а обмеження смуги пропускання запобігло перевантаженню каналу. При низькій пропускній здатності (50 Мбіт/с) без QoS спостерігалися значні втрати та артефакти, тоді як після оптимізації якість залишалася прийнятною [4].

Додатково було протестовано вплив різних стратегій чергування (PQ vs CBWFQ). Priority Queuing показав найкращі результати для часово-критичного трафіку, але за умови перевантаження може призводити до starvation нижчих черг. CBWFQ забезпечує більш справедливий розподіл ресурсів.

У цілому, реалізовані механізми QoS дозволили значно підвищити стабільність роботи AR/VR-додатку в умовах обмежених мережевих ресурсів. Отримані результати підтверджують практичну цінність QoS для сучасних мультимедійних систем реального часу та можуть бути використані при проектуванні реальних мереж підтримки AR/VR.

Впровадження QoS у моделі мережі є ефективним інструментом оптимізації, що дозволяє досягти необхідного рівня Quality of Experience навіть при неідеальних умовах з'єднання.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження застосування технологій доповненої та віртуальної реальності в комп'ютерних мережах, а також виконано практичне моделювання мережевої інфраструктури для підтримки AR/VR-додатку. Аналіз сучасного стану розвитку даної галузі показав, що технології AR та VR активно впроваджуються в різних сферах діяльності, включаючи освіту, медицину, промисловість, військову підготовку, архітектурне проектування та індустрію розваг. Розширення сфер використання таких технологій супроводжується зростанням вимог до комп'ютерних мереж, оскільки передача мультимедійного контенту та синхронізація користувачів у режимі реального часу потребують значних мережевих ресурсів. Саме тому питання забезпечення необхідного рівня продуктивності мережевої інфраструктури є одним із ключових напрямів розвитку сучасних AR/VR-систем.

У ході виконання роботи було досліджено принципи функціонування технологій доповненої та віртуальної реальності. Встановлено, що доповнена реальність забезпечує накладання цифрових об'єктів на реальне середовище користувача, тоді як віртуальна реальність створює повністю цифровий простір для взаємодії. Незважаючи на відмінності в способах відображення інформації, обидва підходи потребують ефективного обміну даними між клієнтськими пристроями та мережевою інфраструктурою. Аналіз показав, що розвиток апаратних засобів, графічних процесорів та телекомунікаційних технологій сприяв значному поширенню AR/VR-рішень та формуванню нових вимог до сучасних мереж передачі даних. У роботі проаналізовано архітектуру сучасних AR/VR-систем. Визначено, що найбільш поширеною моделлю є клієнт-серверна архітектура, у якій сервер забезпечує централізовану обробку даних, синхронізацію дій користувачів та підтримку цілісності віртуального середовища. Розглянуто також особливості розподілених та гібридних архітектур, які використовуються в системах із великою кількістю користувачів. Проведений аналіз дозволив зробити висновок, що клієнт-серверний підхід

залишається найбільш ефективним для багатокористувацьких AR/VR-додатків завдяки можливості централізованого контролю та спрощенню управління мережею.

Окрему увагу приділено дослідженню мережевих вимог AR/VR-додатків. Встановлено, що якість функціонування таких систем безпосередньо залежить від характеристик мережевого середовища. Основними параметрами є пропускна здатність каналу зв'язку, затримка передачі даних, рівень втрати пакетів та варіація затримки. З'ясовано, що навіть незначне збільшення затримки може негативно впливати на комфорт користувача та викликати погіршення сприйняття віртуального середовища. Отримані результати підтвердили необхідність забезпечення низьких затримок і стабільної передачі даних для ефективного функціонування AR/VR-сервісів. У процесі дослідження було проаналізовано основні протоколи передачі даних, які використовуються в AR/VR-середовищах. Встановлено, що для передачі потокового мультимедійного контенту переважно застосовується протокол UDP, який забезпечує мінімальні затримки та високу швидкість передачі інформації. Для службових повідомлень і даних, що потребують гарантованої доставки, використовується TCP. Аналіз показав, що комбіноване використання цих протоколів дозволяє забезпечити баланс між швидкістю передачі даних та надійністю мережевої взаємодії.

У роботі також розглянуто застосування сучасних телекомунікаційних технологій для підтримки AR/VR-систем. Проведений аналіз показав, що мережі п'ятого покоління (5G) створюють передумови для широкого впровадження AR/VR-додатків завдяки високій швидкості передачі даних та мінімальним затримкам. Досліджено особливості використання периферійних обчислень (Edge Computing), які дозволяють переносити обробку даних ближче до користувача та зменшувати навантаження на центральні сервери. Крім того, встановлено, що хмарні сервіси забезпечують масштабованість систем та спрощують розгортання AR/VR-платформ у глобальних мережах. Одним із важливих напрямів дослідження стало вивчення питань забезпечення якості

обслуговування (QoS) та якості користувацького досвіду (QoE). Аналіз наукових джерел і сучасних практичних рішень показав, що застосування механізмів QoS дозволяє здійснювати пріоритезацію критично важливого трафіку, зменшувати затримки передачі даних та підвищувати стабільність роботи мережі. Встановлено, що ефективне використання механізмів керування трафіком безпосередньо впливає на якість взаємодії користувача з AR/VR-середовищем та забезпечує більш комфортний досвід використання таких систем.

У практичній частині роботи було виконано моделювання комп'ютерної мережі для підтримки багатокористувацького VR-додатку в середовищі Cisco Packet Tracer. Розроблена мережева топологія включала клієнтські пристрої, сервер обробки даних, комутатор, маршрутизатор та канал доступу до мережі. Використання клієнт-серверної архітектури дозволило відтворити типову структуру сучасної AR/VR-системи та забезпечило можливість проведення подальших експериментальних досліджень. Під час моделювання було виконано генерацію мережевого навантаження, характерного для AR/VR-додатків. Для цього було змодельовано передачу потокового мультимедійного трафіку та службових повідомлень між клієнтами і сервером. Отримані результати підтвердили, що зі збільшенням навантаження на мережу зростають вимоги до пропускної здатності каналів зв'язку та продуктивності мережевого обладнання. Аналіз також показав, що недостатня пропускна здатність призводить до збільшення затримок та погіршення якості роботи віртуального середовища. Окремо було досліджено вплив затримки передачі даних та пропускної здатності мережі на якість функціонування AR/VR-додатку. У ході експериментів встановлено, що збільшення затримки негативно впливає на швидкість взаємодії користувачів із віртуальним середовищем, а обмеження пропускної здатності призводить до погіршення передачі мультимедійного контенту. Отримані результати підтверджують важливість правильного проєктування мережевої інфраструктури для забезпечення стабільної роботи AR/VR-систем. Для підвищення ефективності функціонування мережі було досліджено можливість використання механізмів QoS. Проведене моделювання

показало, що пріоритезація мультимедійного та службового трафіку дозволяє більш раціонально використовувати мережеві ресурси та забезпечувати стабільну передачу даних навіть за умов підвищеного навантаження. Використання механізмів керування трафіком сприяє зменшенню затримок і підвищенню загальної якості обслуговування користувачів.

Таким чином, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто. У результаті проведеного дослідження визначено особливості застосування AR/VR-технологій у комп'ютерних мережах, проаналізовано основні вимоги до мережевої інфраструктури, досліджено сучасні підходи до передачі даних та виконано практичне моделювання мережі для підтримки багатокористувацького VR-додатку. Отримані результати підтвердили, що забезпечення достатньої пропускної здатності, мінімальних затримок передачі даних та ефективне використання механізмів QoS є необхідними умовами для стабільного функціонування сучасних AR/VR-систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даков С. Ю. Моделювання та аналіз продуктивності SDN мереж з використанням Mininet : кваліфікаційна наукова праця [Електронний ресурс] / С. Ю. Даков ; Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. – Київ, 2019. – Режим доступу: https://scc.knu.ua/upload/iblock/dad/dis_Dakov%20S..pdf.
2. Ломакін А., Батурін М. ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ПСИХОЛОГІЇ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ. *Вісник ХНПУ імені Г С Сковороди "Психологія."* 2025. № 73. С. 99. URL: <https://doi.org/10.34142/23129387.2025.73.07>
3. Практичне моделювання мереж у Cisco Packet Tracer : практичне заняття [Електронний ресурс] / Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк, [б. р.]. – Режим доступу:
https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0/other/5_pr_internet_rechej_v_elektroniczi.pdf.
4. Сучасні програмні засоби моделювання та оптимізації мереж зв'язку : навч.-метод. матеріали [Електронний ресурс] / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2021. – Режим доступу: <https://cn.nure.ua/wp-content/uploads/2021/11/suchasni-i-programni-zasobi-modeljuvannja-ta-optimizacii-merezh-zvjazku-nu-1.pdf>.
5. 360-Degree Video Bandwidth Reduction: Technique and Approaches Comprehensive Review / E. S. Wong et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, no. 15. P. 7581. URL: <https://doi.org/10.3390/app12157581>
6. An Edge-Computing Based Architecture for Mobile Augmented Reality / J. Ren et al. *IEEE Network*. 2019. Vol. 33, no. 4. P. 162–169. URL: <https://doi.org/10.1109/mnet.2018.1800132> .
7. An experimental evaluation of rate-adaptive video players over HTTP / S. Akhshabi et al. *Signal Processing: Image Communication*. 2012. Vol. 27, no. 4. P. 271–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.image.2011.10.003> .

8. A Survey of Green Networking Research / A. P. Bianzino et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2012. Vol. 14, no. 1. P. 3–20.
URL: <https://doi.org/10.1109/surv.2011.113010.00106> .
9. A Survey of Information-Centric Networking Research / G. Xylomenos et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2014. Vol. 16, no. 2. P. 1024–1049.
URL: <https://doi.org/10.1109/surv.2013.070813.00063>
10. A Survey on Mobile Augmented Reality With 5G Mobile Edge Computing: Architectures, Applications, and Technical Aspects / Y. Siriwardhana et al. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2021. Vol. 23, no. 2. P. 1160–1192.
URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2021.3061981>
11. Burdea G., Coiffet P. Virtual Reality Technology. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*. 2003. Vol. 12, no. 6. P. 663–664.
URL: <https://doi.org/10.1162/105474603322955950>
12. Chen W. College Cross-Country Skiing Teaching and Sports Training Based on VR. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022. P. 1–9.
URL: <https://doi.org/10.1155/2022/8301746>
13. Chen Z., Li X. Streaming Load and Rendering Optimization for Mobile VR or AR Art Exhibitions. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*. 2025. Vol. 19, no. 19. P. 151–165.
URL: <https://doi.org/10.3991/ijim.v19i19.58317>
14. Cicconetti C., Conti M., Passarella A. A Decentralized Framework for Serverless Edge Computing in the Internet of Things. *IEEE Transactions on Network and Service Management*. 2020. P. 1.
URL: <https://doi.org/10.1109/tnsm.2020.3023305>
15. Conti M., Dragoni N., Lesyk V. A Survey of Man In The Middle Attacks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, no. 3. P. 2027–2051. URL: <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2548426>
16. Edge Computing: Vision and Challenges / W. Shi et al. *IEEE Internet of Things Journal*. 2016. Vol. 3, no. 5. P. 637–646.
URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2016.2579198>

17. Edge intelligence computing for mobile augmented reality with deep reinforcement learning approach / M. Chen et al. *Computer Networks*. 2021. Vol. 195. P. 108186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108186>
18. Edge intelligence for 6G networks / H. Zheng et al. *China Communications*. 2022. Vol. 19, no. 8.
URL: <https://doi.org/10.23919/jcc.2022.9911213> (date of access: 08.03.2026).
19. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing / X. Chen et al. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016. Vol. 24, no. 5. P. 2795–2808. URL: <https://doi.org/10.1109/tnet.2015.2487344>
20. Else J. Climbing the Virtual Stepladder: Exploring the Reality of Virtual Worlds in Performance. *Body, Space & Technology*. 2018. Vol. 17, no. 1. P. 34.
URL: <https://doi.org/10.16995/bst.295>
21. Evolution of Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) / A. Thampan et al. *International Journal of Research Publication and Reviews*. 2023. Vol. 4, no. 4. P. 5449–5454.
URL: <https://ijrpr.com/uploads/V4ISSUE4/IJRPR12239.pdf>
22. Feng Qian, Bo Han, Qingyang Xiao. Flare: Practical Viewport-Adaptive 360-Degree Video Streaming for Mobile Devices.
URL: <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3241539.3241565>
23. Furion: Engineering High-Quality Immersive Virtual Reality on Today's Mobile Devices / Z. Lai et al. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2020. Vol. 19, no. 7. P. 1586–1602. URL: <https://doi.org/10.1109/tmc.2019.2913364>
24. Grabarczyk P. What is Real in Virtual Reality?. *Roczniki Filozoficzne*. 2024. Vol. 72, no. 1. P. 79–98. URL: <https://doi.org/10.18290/rf24721.5>

ДОДАТОК А

КОНФІГУРАЦІЯ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМИ

А.1. Конфігурація маршрутизатора (Router 4331)

Router> enable

Router# configure terminal

! Назва пристрою

hostname R1

! Інтерфейси

interface GigabitEthernet0/0/0

ip address 192.168.1.1 255.255.255.0

no shutdown

interface GigabitEthernet0/0/1

ip address 10.0.0.1 255.255.255.0

no shutdown

! Статична маршрутизація

ip route 0.0.0.0 0.0.0.0 10.0.0.2

! QoS – Class-Map

class-map match-any VR-SYNC

match dscp ef

class-map match-any VR-VIDEO

match dscp af41

! QoS – Policy-Map

policy-map ARVR-QoS

class VR-SYNC

```

priority percent 40
class VR-VIDEO
bandwidth percent 50
class class-default
fair-queue

```

```

! Застосування політики
interface GigabitEthernet0/0/1
service-policy output ARVR-QoS

```

```

! Traffic Policing (обмеження)
class-map match-any NON-ARVR
match any

```

```

policy-map LIMIT-NONARVR
class NON-ARVR
police 20000000 conform-action transmit exceed-action drop

```

```
end
```

A.2. Конфігурація комутатора (Switch 2960)

```

Switch> enable
Switch# configure terminal
hostname SW1
! VLAN (за потреби)
vlan 10
name VR-CLIENTS
interface range FastEthernet0/1 - 3
switchport mode access
switchport access vlan 10
no shutdown

```

```

interface GigabitEthernet0/1
  switchport mode trunk
  no shutdown

end

```

А.3. Налаштування IP-адрес клієнтських пристроїв та сервера

Таблиця А.1 – IP-адресація пристроїв

Пристрій	Інтерфейс	IP-адреса	Маска підмережі	Шлюз за замовчуванням
VR-Client-1	NIC	192.168.1.10	255.255.255.0	192.168.1.1
VR-Client-2	NIC	192.168.1.11	255.255.255.0	192.168.1.1
VR-Client-3	NIC	192.168.1.12	255.255.255.0	192.168.1.1
Server-PT	NIC	192.168.1.100	255.255.255.0	192.168.1.1
Router (R1)	Gi0/0/0	192.168.1.1	255.255.255.0	–
Router (R1)	Gi0/0/1	10.0.0.1	255.255.255.0	–
Cloud / ISP	–	10.0.0.2	255.255.255.0	10.0.0.1

А.4. Додаткові налаштування

- На сервері запущено HTTP-сервер для імітації потокового відео.
- На VR-клієнтах налаштовано Application Traffic для генерації UDP (синхронізація) та TCP (відео).
 - У Cloud-PT налаштовано параметри каналу (затримка, bandwidth, packet loss) для експериментів.