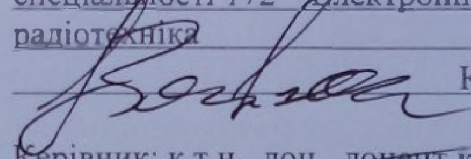


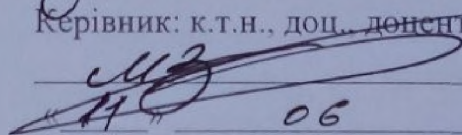
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ТРАФІКУ В
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

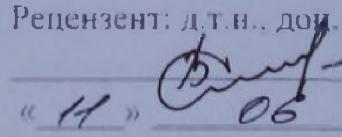
Виконав: студент 2-го курсу, групи ПЗТ-23мсз
спеціальності 172 – Електронні комунікації та
радіотехніка

 Кравченко М. Р.

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ІКСТ

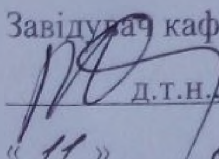
 Васильківський М. В.
« 14 » 06 2025 р.

Рецензент: д.т.н., доц., доцент каф. ІРТС

 Воловик А. Ю.
« 14 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідуюча кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В. М.
« 14 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
« 5 » 05 2025 року

З А В Д А Н И Я
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
Кравченку Максиму Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Метод оцінювання інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління

керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові; науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від "20" березня 2025 року № 97

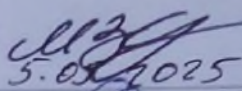
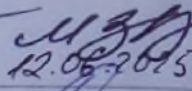
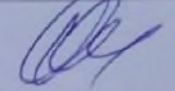
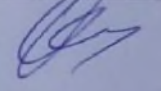
2. Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: середня швидкість інформаційного потоку: до 4,32 Гбіт/с (для повнокольорового 3D-потoku з глибиною 24 біти, частотою кадрів 30 fps роздільністю 2Kx2K); пікова швидкість передачі: 6–8 Гбіт/с; коефіцієнт самоподібності H: 0,82–0,91 (високий рівень фрактальності); граничне навантаження (MOS ≥ 4): ≤ 32 одночасних потоків; пропускна здатність каналу доступу: ≥ 10 Гбіт/с; середня затримка (end-to-end): ≤ 1 мс; доступність мережі: $\geq 99,999\%$; час відповіді (RTT): < 5 мс; щільність з'єднань: до 1 млн пристроїв/км².

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібні розробити): вступ, голографічні телекомунікаційні сервіси нового покоління, аналіз характеристик трафіку для підтримки голографічних комунікацій у мережах нового покоління, оцінювання показників якості сприйняття голографічного конференц-зв'язку, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
функціональна модель системи в середовищі моделювання AnyLogic, струн
імітаційної моделі в середовищі AnyLogic, Структура системи переда
голографічного конференц-зв'язку, залежність оцінки якості сприй
голографічного контенту від кількості з'єднань.

6. Консультанти розділів роботи

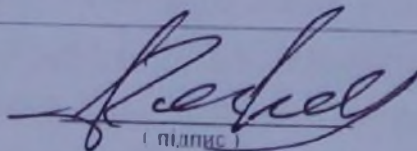
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання при
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 5.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ	 5.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

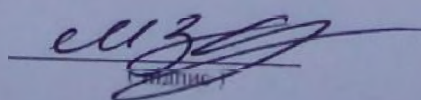
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прип
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Здобувач


(підпис)

Кравченко М.Р.

Керівник роботи


(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Кравченко М. Р. Метод оцінювання інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 85 с. На укр. мові. Бібліогр.: 45 назв; рис.: 29; табл. 14.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто метод оцінювання інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління з акцентом на голографічний тип комунікацій. Вперше запропоновано статистичні моделі, що відображають структуру трафіку новітніх сервісів: мультимедійний трафік описано як суміш чотирьох гамма-розподілів; трафік голографічного типу комунікацій — як суміш експоненційного та гамма-розподілів; трафік Інтернету речей — як комбінацію розподілу Вейбулла, нормального розподілу та кількох гамма-розподілів. Розглянуто модельну мережу для дослідження параметрів передачі тривимірного відеопотоку та проведено суб'єктивну оцінку якості голографічного конференцв'язку за шкалою MOS. Виявлено граничні значення навантаження, при яких якість сприйняття суттєво знижується. Результати дослідження мають як теоретичне, так і прикладне значення: запропоновані моделі та методики можуть бути використані для формування вимог до архітектури мереж наступних поколінь, а також для вдосконалення критеріїв оцінювання якості обслуговування голографічного контенту. Практична цінність полягає у можливості застосування результатів для оптимізації проєктування телекомунікаційних систем, а також у процесі підготовки фахівців галузі в закладах вищої освіти.

Ключові слова: інформаційний трафік, голографічний конференцв'язок, мультисервісна мережа, статистичний розподіл.

ABSTRACT

UDC 621.396

Kravchenko M. R. Method for Assessing Information Traffic in Fifth-Generation Telecommunication Networks. Bachelor's qualification work in specialty 172 – Electronic Communications and Radiotechnics, educational program – Software for Telecommunication Systems. Vinnytsia: VNTU, 2025. 85 p.

In Ukrainian. Bibliography: 45 titles; figures: 29; tables: 14.

This bachelor's qualification work presents a method for assessing information traffic in fifth-generation (5G) telecommunication networks, with a focus on the holographic type of communication. For the first time, statistical models have been proposed to reflect the structure of next-generation service traffic: multimedia traffic is modeled as a mixture of four gamma distributions; holographic communication traffic as a mixture of exponential and gamma distributions; and Internet of Things traffic as a combination of Weibull, normal, and multiple gamma distributions.

A model network was developed to study the parameters of 3D video stream transmission, and a subjective quality assessment of holographic conferencing was conducted using the MOS (Mean Opinion Score) scale. Threshold load values were identified, beyond which user-perceived quality degrades significantly.

The research findings hold both theoretical and practical significance: the proposed models and methods can be used to define network architecture requirements for next-generation systems and to improve quality of service (QoS) and quality of experience (QoE) evaluation criteria for holographic content. The practical relevance lies in the applicability of the results to optimize the design of telecommunication systems, as well as their use in the educational process for training specialists in telecommunications, IT, and communication systems.

Keywords: information traffic, holographic conferencing, multiservice network, statistical distribution.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ГОЛОГРАФІЧНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СЕРВІСИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ	10
1.1 Сукупність ключових понять і визначень у межах дослідження.....	10
1.2 Ключові аспекти голографічного зв'язку: теоретичний та прикладний огляд	13
1.3 Ключові етапи розвитку голографічних технологій	14
1.4 Актуальні проблеми передавання голографічних зображень у мережах зв'язку	17
1.5 Аналіз та технічні параметри апаратного забезпечення для систем голографічної комунікації	20
1.6 Висновки до розділу 1	32
2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ГОЛОГРАФІЧНИХ КОМУНІКАЦІЙ У МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ	33
2.1 Моделювання агрегованого потоку голографічного трафіку.....	33
2.2 Опис імітаційної моделі.....	34
2.3 Моделювання передавання змішаного трафіку	43
2.4 Висновки до розділу 2	46
3 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ГОЛОГРАФІЧНОГО КОНФЕРЕНЦ-ЗВ'ЯЗКУ	48
3.1 Особливості застосування голографічних технологій	48
3.2 Дослідження якості сприйняття голографічного конференц-зв'язку.....	52
3.3 Оцінювання результатів дослідження.....	54
3.4 Висновки до розділу 3	61
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	62
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	63

	5
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	66
4.3 Пожежна безпека.....	71
ВИСНОВКИ.....	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	82
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	85

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3D	Тривимірне зображення
5G	П'яте покоління мобільного зв'язку
AI	Штучний інтелект
AR	Доповнена реальність
CGH	Комп'ютерно-згенеровані голограми
DWDM	Щільне спектральне мультиплексування
GTK	Голографічний тип комунікації
HT	Голографічна телепортація
HTC	Голографічний тип комунікації
IoT	Інтернет речей
IT	Імерсивні технології
MR	Змішана реальність
MSE	Міжнародний союз електрозв'язку
MSE-T	Міжнародний союз електрозв'язку, сектор стандартизації телекомунікацій
PKM	Програмно-конфігуровані мережі
P3	Програмне забезпечення
QoE	Якість досвіду користувача
QoS	Якість обслуговування
RTT	Час затримки в обидва боки (відправлення — отримання — відповідь)
SDN	Програмно-керовані мережі
VR	Віртуальна реальність
XR	Розширена реальність
IKT	Інфокомунікаційні технології
IP	Інтернет речей
IT	Імерсивні технології
ЦОД	Центр обробки даних
ШІ	Штучний інтелект

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний етап розвитку характеризується стрімким прогресом телекомунікаційних технологій та інформаційних сервісів, які активно впроваджуються в усі сфери людської діяльності. Протягом останніх двох десятиліть галузь зв'язку зазнала суттєвих трансформацій: розширено спектр відеопослуг, впроваджено сервіси доповненої реальності, що, у свою чергу, зумовило появу нової форми комунікації — голографічного типу (НТС, Holographic Type Communication) [1].

Передача голографічного контенту, яка дозволяє створити ефект присутності співрозмовника, викликає значний науковий і прикладний інтерес як серед дослідників, так і серед кінцевих користувачів. Цей інтерес підтверджується активною розробкою й появою широкого спектра технічних засобів, здатних формувати, передавати та відтворювати голографічний потік у режимі реального часу. Такий тип комунікації потребує надзвичайно високих показників пропускної здатності мереж, яка може коливатися від 10 Мбіт/с до 4,2 Тбіт/с залежно від конкретного сценарію. Основні прикладні сценарії та функціональні вимоги до систем телеприсутності визначені в Рекомендації МСЕ-Т F.734. Згідно з нею, телеприсутність — це сеанс інтерактивної аудіовізуальної взаємодії між географічно віддаленими об'єктами, що забезпечує ефект фізичної присутності завдяки синхронному узгодженню ряду візуальних, звукових та просторових характеристик. У цьому контексті голографічний тип комунікації виступає як наступний етап еволюції систем телеприсутності, відкриваючи нові можливості для користувачів у сфері віртуальної взаємодії [2].

З огляду на динаміку розвитку голографічних сервісів, виникає нагальна потреба в переосмисленні підходів до проектування, планування та побудови мереж зв'язку, а також в адаптації архітектури майбутніх мереж шостого покоління (6G), основою яких стане інтеграція гетерогенних технологій у єдине комунікаційне середовище. Окремим науково-практичним викликом постає

проблема оцінки якості обслуговування (QoS) та якості сприйняття (QoE) голографічних послуг. На сьогодні практично відсутні стандартизовані критерії та шкали для об'єктивної і суб'єктивної оцінки якості голографічного зображення. Властивості голографічного трафіку залишаються недостатньо дослідженими, як і його вплив на параметри функціонування телекомунікаційних мереж. У зв'язку з цим дослідження характеристик голографічного трафіку, а також методів оцінки якості обслуговування відповідних послуг набуває особливої актуальності, з огляду на перспективи широкомасштабного впровадження голографічних комунікацій у майбутніх мережах зв'язку [3].

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні існує значна кількість наукових та прикладних досліджень, присвячених питанням формування та передачі даних у мережах зв'язку п'ятого, шостого та наступних поколінь, а також відтворення голографічних зображень — як у теоретичному, так і в експериментальному аспектах. Вагомий внесок у розвиток цього наукового напрямку зробили дослідники, зокрема: К. Matsushima, Y. Arima, I. F. Akyildiz, M. T. Vega [4].

У наукових працях зазначених авторів розглядаються проблеми, пов'язані з архітектурою, організацією та функціонуванням мереж зв'язку нового покоління, що спрямовані на підтримку інноваційних сервісів, таких як доповнена реальність, тактильний Інтернет, автономний транспорт тощо. Зокрема, увага зосереджена на побудові математичних моделей функціонування мереж, розробці ефективних підходів до архітектурного проєктування з урахуванням зростаючих вимог до нових сервісів, оптимізації використання обчислювальних ресурсів, а також забезпеченні належної якості надання послуг.

Водночас, у більшості наявних робіт недостатньо досліджено особливості трафіку голографічних сервісів, його вплив на параметри функціонування мереж п'ятого та наступних поколінь, а також відсутній аналіз якості надання таких послуг із використанням суб'єктивних методів оцінювання. Зазначені обставини зумовлюють актуальність теми, визначають мету, завдання, об'єкт і предмет даної бакалаврської кваліфікаційної роботи [5].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розроблення методичного підходу до оцінювання інформаційного трафіку голографічного типу комунікацій у телекомунікаційних мережах п'ятого та наступних поколінь шляхом побудови математичних моделей трафіку та проведення суб'єктивного оцінювання якості надання голографічного конференцзв'язку.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

- аналіз сучасних голографічних сервісів та особливостей голографічного типу комунікацій, а також визначення вимог до розвитку мереж зв'язку п'ятого і наступних поколінь з метою їх реалізації;
- дослідження структури мультимедійного трафіку, включаючи голографічні потоки та трафік Інтернету речей, у контексті функціонування мереж нового покоління;
- аналіз принципів архітектурної побудови мереж зв'язку для забезпечення передачі голографічного трафіку та підтримки відповідних сервісів;
- розроблення структурної моделі телекомунікаційної мережі, орієнтованої на підтримку голографічних послуг;
- моделювання процесів передачі тривимірного відеопотоку в експериментальному середовищі з використанням технології DWDM;
- побудова моделі мультимедійного трафіку, яка охоплює компоненти голографічних комунікацій та трафік пристроїв Інтернету речей;
- моделювання процесів обслуговування голографічного трафіку в мережах зв'язку п'ятого та наступних поколінь;
- розроблення та апробація суб'єктивної методики оцінювання якості сприйняття голографічного конференцзв'язку користувачами.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ГОЛОГРАФІЧНІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ СЕРВІСИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

Ключовою характеристикою сучасного етапу розвитку інформаційно-комунікаційних технологій є підвищення рівня інтерактивності комунікацій. Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить про чітко виражену тенденцію до вирішення завдання реалістичного відтворення голографічного образу співрозмовника в режимі реального часу у рамках телекомунікаційної взаємодії. Такий підхід забезпечує новий рівень сприйняття — ефект присутності, коли абонент може візуально спостерігати співрозмовника та взаємодіяти з ним за допомогою голографічного аватара [6].

На відміну від стереоскопічного зображення, яке створює лише ілюзію тривимірності, голографічне відображення є об'єктивним відтворенням фізичного об'єкта у тривимірному просторі, що сприймається незалежно від положення спостерігача. Для забезпечення таких комунікацій було реалізовано технологію голографічного зв'язку, яка дозволяє передавати голографічні копії об'єктів у реальному масштабі часу, що відкриває нові можливості у сфері мультимедійних сервісів майбутнього покоління [7].

1.1 Сукупність ключових понять і визначень у межах дослідження

У межах даного дослідження виділяється базова група термінів, що характеризують предметну область: голографічний тип комунікації (НТС), голографічний зв'язок, голографічне телеприсутність, голографічна телепортація (голопортація), голографічні копії, голографічний аватар, іммерсивні технології в телекомунікаційних системах. Згідно з рекомендаціями Міжнародного союзу електрозв'язку (МСЕ), під голографічною комунікацією (НТС) розуміється технологія, яка забезпечує інтерактивну передачу цифрових тривимірних (3D) зображень від одного або кількох джерел до одного або кількох приймальних вузлів. Технологія НТС дозволяє передавати голограми та

мультимодальний мультимедійний контент через дротові та бездротові канали зв'язку у віддалені точки [8].

Типова структура системи НТС включає три основні компоненти: джерело голографічного контенту (створення або зберігання), транспортну мережу та приймальний пункт, де здійснюється візуалізація голограм і мультимедіа. У роботах окремих дослідників НТС визначається як комунікаційна технологія, що базується на спеціалізованих методах захоплення та реконструкції тривимірних об'єктів за допомогою голографії. У науковій літературі НТС трактується як технологічна основа для високореалістичних та інтерактивних форм комунікації, орієнтованих на створення ефекту присутності в режимі реального часу.

Голографічна комунікація реалізує три основні етапи: запис голографічного контенту, його передача через мережі нового покоління та реконструкція голографічного образу на стороні приймача. Така архітектура дозволяє забезпечити природну взаємодію між користувачами в умовах повної віртуальної присутності. Технологія голографічного телеприсутності визначається як інноваційна система тривимірних відеокommunікацій, що забезпечує трансляцію реалістичних 3D-зображень учасників у фізичне середовище з одночасною аудіокommunікацією, яка за якістю може конкурувати з традиційною фізичною присутністю. Передача голографічного потоку здійснюється через високошвидкісні канали, де зображення фіксується, стискається, передається, декодується та проектується за допомогою лазерних систем.

Holoportation — це тип технології тривимірного захоплення, що дозволяє здійснювати віддалену передачу 3D-моделей людей у реальному часі. У поєднанні з пристроями доповненої реальності (наприклад, HoloLens), ця технологія забезпечує користувачам можливість бачити, чути та взаємодіяти з віддаленими учасниками у форматі тривимірного простору. Розширена реальність (XR) — це узагальнююче поняття, яке охоплює віртуальну реальність (VR), доповнену реальність (AR) та змішану реальність (MR). XR-технології

забезпечують глибоку інтеграцію віртуального контенту у процес взаємодії, створюючи ефект повного занурення у цифрове середовище [9].

Термін голографічна копія у межах цього дослідження трактується як цифрова репрезентація об'єкта, створена шляхом запису, обробки та реконструкції, достатня для візуалізації голографічного зображення та забезпечення взаємодії в межах НТС. Голографічний аватар — це фотореалістична 3D-модель користувача, створена на основі фізичного прототипу з використанням нейромережових та алгоритмічних засобів штучного інтелекту. На відміну від цифрових аватарів, якими безпосередньо керує користувач, голографічний аватар є повністю автономним і функціонує на основі машинного навчання. Іммерсивні технології в телекомунікаціях — це сукупність рішень, які доповнюють традиційні канали зв'язку ефектами занурення, шляхом візуалізації тривимірного контенту, просторового аудіо, тактильного зворотного зв'язку та іншими видами стимуляції органів чуття, що забезпечують ефект фізичної присутності [10].

З урахуванням викликів, що постають перед критично важливими галузями — освітою, медициною, будівництвом, транспортом, фінансами, оборонною та безпековою сферою — очікується широке впровадження телекомунікаційних сервісів на основі 5G і наступного покоління (6G), зокрема тих, що реалізують голографічну комунікацію. До 2035 року прогнозується потреба у таких технологіях як: мобільний зв'язок зі швидкістю понад 50 Мбіт/с, фіксований широкосмуговий доступ зі швидкістю понад 1 Гбіт/с, супутниковий та вузькосмуговий зв'язок. Підсумовуючи, варто наголосити, що розвиток голографічної комунікації на основі технологій 5G/6G є важливим чинником підвищення технологічного суверенітету держави. Це створює обґрунтовану потребу у подальшому розширенні наукових досліджень у даному напрямі, гармонізації термінологічного апарату та формуванні методологічної бази дослідження голографічного типу зв'язку [11].

1.2 Ключові аспекти голографічного зв'язку: теоретичний та прикладний огляд

Голографічна комунікація на сучасному етапі розвитку є однією з найінноваційніших форм передавання інформації, яка ґрунтується на використанні голографічних технологій для формування тривимірних (3D) зображень та їхньої проєкції у реальний фізичний простір. У зв'язку з цим, при аналізі голографічної комунікації як перспективної технології нового покоління, ключову увагу доцільно зосередити на її потенціалі забезпечувати більш природну, реалістичну та зручну взаємодію між абонентами.

Створення тривимірного об'ємного зображення дозволяє візуалізувати співрозмовника з різних кутів огляду без потреби у використанні спеціальних окулярів або інших допоміжних пристроїв. Голографічне відтворення жестів, міміки та інших невербальних сигналів сприяє зростанню емоційної насиченості комунікації, підвищує рівень її зрозумілості та зменшує ризики хибного трактування інформації, створюючи ефект фізичної присутності співрозмовника. Наступною критично важливою характеристикою голографічного типу комунікації (ГТК) є можливість передавання та формування голограм у режимі реального часу. Комунікація, що відбувається у форматі «тут і зараз», коли віртуальний співрозмовник безпосередньо реагує на поточну ситуацію, є принциповою відмінністю ГТК від інших форм взаємодії. Така специфіка веде до логічного висновку про ключову технічну вимогу до ГТК — необхідність високої пропускної здатності каналів зв'язку для передавання значних обсягів даних. Ще однією важливою ознакою ГТК є потреба в наявності декількох джерел збору первинних даних. Збір інформації про об'єкти чи суб'єкти здійснюється за допомогою багатокамерних систем або сенсорних пристроїв, що дозволяє отримати повноцінну тривимірну реконструкцію. Ці дані є основою для подальших етапів обробки: адаптації, реконструкції, кодування, стиснення тощо.

Також варто наголосити на іммерсивності голографічної комунікації. На відміну від традиційних двовимірних (2D) форматів, ГТК забезпечує ефект

повного занурення в комунікаційний процес, що значною мірою підвищує реалістичність взаємодії. Крім того, високі вимоги до характеристик телекомунікаційної інфраструктури є ще однією відмінною рисою голографічної комунікації. Зокрема, технології HTC (holographic-type communication) потребують значно більшої пропускної здатності, ніж традиційні сервіси зв'язку. Це зумовлено особливостями цифрової телепортації та передавання голографічних копій, що накладає виключно високі вимоги до мережевої інфраструктури. Отже, висока пропускна здатність, наднизькі затримки та гарантована надійність з'єднання є критично важливими умовами для масштабного впровадження голографічних сервісів зв'язку. Це, своєю чергою, обумовлює потребу в активізації дослідницької діяльності, спрямованої на вивчення, тестування та вдосконалення технологій голографічного типу комунікації. Згідно з даними дослідників [12], очікується, що майбутні телекомунікаційні системи нового покоління забезпечуватимуть надвисоку швидкість передавання даних, стабільність з'єднання та мінімальний рівень затримок, що дозволить повною мірою реалізувати потенціал голографічного типу зв'язку в широкому спектрі прикладних сфер.

1.3 Ключові етапи розвитку голографічних технологій

Актуальність дослідження, присвяченого розвитку голографічних технологій, зумовлена переходом до нового етапу впровадження інноваційних рішень у сфері цифрових технологій. Однією з провідних тенденцій цього етапу є перспективне застосування голографії як високоефективного засобу передачі та візуалізації інформації. На сучасному етапі простежується стійка глобальна тенденція до активного використання тривимірних зображень у різних сферах людської діяльності: від медицини та інженерії до освіти, мистецтва й телекомунікацій. Голографія, як технологія просторового зображення об'єктів, є одним з найбільш перспективних напрямів візуалізації 3D-даних, що обґрунтовує науковий інтерес до цього напрямку досліджень.

Голографічне зображення має унікальну здатність точно відтворювати просторову структуру об'єкта, на відміну від традиційної фотографії, яка формує лише двовимірну проекцію. Завдяки можливості змінювати кут огляду, голограма формує багаторакурсне зображення, що створює ілюзію реальної присутності об'єкта, часто майже не відрізняючи його від фізичної реальності. Інтенсивне впровадження цифрових технологій забезпечило технічне підґрунтя для розкриття потенціалу голографічного методу фіксації, обробки та передавання інформації. Це підтверджується експоненційним зростанням кількості наукових публікацій, присвячених теоретичним основам і практичним аспектам голографії, що вказує на високу актуальність та перспективність даного напрямку.

На основі аналізу наукових джерел та опублікованих результатів досліджень можна виокремити кілька ключових етапів становлення та розвитку голографічних технологій:

Перший етап — етап теоретичного відкриття. Його започаткував Деніс Габор у 1947 році, запропонувавши принцип голографічного методу запису інформації. Дана концепція була згодом підтверджена в експериментальних дослідженнях іншими вченими. Цей період характеризується формуванням теоретичних основ та перших уявлень про просторову реконструкцію об'єктів.

Другий етап пов'язаний із розвитком оптичної голографії. Він був зумовлений появою когерентних джерел випромінювання, здатних забезпечити необхідні умови для реалізації голографічного запису. На цьому етапі було започатковано дослідження з фіксації повної інформації про світлове поле, зокрема інтенсивності та фази хвилі. Вагомий внесок у розвиток галузі зробив Ю.М. Денисюк, який запропонував метод створення голограм у тривимірних середовищах, що дозволяє зчитувати інформацію за допомогою білого світла. Саме тоді було створено першу тривимірну голограму [13].

Третій етап — лазерна голографія. Започаткований із впровадженням лазерного випромінювання, цей етап суттєво розширив практичні можливості голографічних технологій. Завдяки високій когерентності лазерів стало

можливим точне відтворення складних об'єктів, що дало поштовх до активного розвитку галузі.

Четвертий етап відзначається диверсифікацією голографічних методів. Паралельно з розвитком оптичної та лазерної голографії з'явилися нові форми застосування: зображувальна голографія, захисна (безпекова) голографія, динамічна голографія. Також почалося поширення аматорської голографії, подібно до етапу популяризації фотографії. Унікальним проявом цього періоду стало використання голографії в мистецтві та кінематографі.

П'ятий етап — цифрова голографія. Завдяки комп'ютерним технологіям з'явилася можливість чисельного синтезу й аналізу хвильових фронтів, що дозволило автоматизувати процес створення голограм. Цей етап суттєво підвищив ефективність методів і сприяв появі нових пристроїв: голографічних дисплеїв, безлінзових цифрових мікроскопів, голографічних окулярів, а також систем дистанційного керування безпілотниками на базі голографічної візуалізації. Результатом подальшого розвитку стало формування мережових голографічних додатків, включно з віртуальними асистентами й голографічною комунікацією, які на сьогодні є одними з найперспективніших складових цифрового середовища для молодіжної аудиторії. Серед найбільш інноваційних напрямів останнього часу слід виокремити цифрову зображувальну голографію, що забезпечує реалістичний ефект присутності завдяки синтезу кольорових об'ємних зображень у режимі реального часу за допомогою програмних засобів.

Розглядаючи еволюцію засобів зв'язку в контексті поступового підвищення технологічного рівня комунікаційних систем, доцільно представити її у вигляді графічної траєкторії — від традиційного стаціонарного телефонного зв'язку до сучасних голографічних засобів комунікації. Така траєкторія передбачає послідовне проходження ключових етапів, зокрема: впровадження мобільного зв'язку, розвиток мультимедійних сервісів, а також поява відеоконференцзв'язку як перехідної ланки до голографічної комунікації. На рисунку 1.1 представлено узагальнену структурно-схематичну модель розвитку систем комунікації відповідно до рівня їх технологічної складності [14].

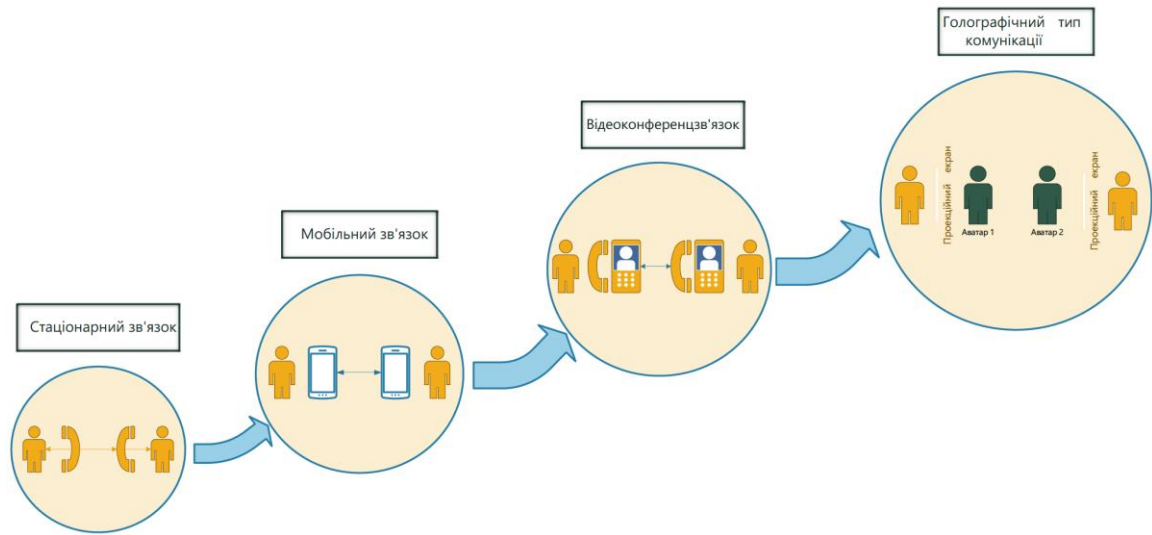


Рисунок 1.1 – Інноваційна динаміка розвитку телекомунікаційних технологій

Узагальнюючи результати проведеного дослідження, можна сформулювати такий висновок. Голографічний метод фіксації інформації, що є базовою технологічною основою для розвитку голографічних систем та засобів комунікації, перебуває на початковому етапі свого розкриття й реалізації потенціалу. У разі впровадження стратегії, орієнтованої на забезпечення широкого та загальнодоступного застосування цього методу, можлива трансформація численних сфер людської діяльності, поява принципово нових інноваційних продуктів, а також формування нових міждисциплінарних напрямів використання голографії [15].

1.4 Актуальні проблеми передавання голографічних зображень у мережах зв'язку

Розв'язання задачі збалансованого розвитку повного спектра інноваційних технологій, необхідних для забезпечення передавання даних у сучасних телекомунікаційних мережах, виявляє суперечність між зростаючим потенціалом голографічної комунікації та недостатнім рівнем вивченості питань, пов'язаних із передаванням голографічного контенту. Ця суперечність формує

потребу в проведенні комплексу досліджень, що охоплюють етапи запису, обробки, адаптації, реконструкції, кодування, стиснення, передавання, синхронізації та відтворення голографічної інформації, а також її практичного застосування, впровадження та підвищення якості відтворення.

Аналізуючи основні напрями досліджень розвитку голографічної комунікації, доцільно зосередити увагу на процесах захоплення інформації, яка згодом формує голографічний контент. Камери з функцією глибини, що фіксують тривимірну інформацію, активно впроваджуються як стандартний сенсорний інструмент. На початковому етапі підготовки до передавання іммерсивного відео одна або декілька камер (сенсорів) повинні зафіксувати необхідні об'єкти або суб'єкти. Тип сенсорів, які застосовуються для 3D-реконструкції, істотно впливає на якість відтворення і вибір відповідних алгоритмів реконструкції. З постійним зростанням кількості доступних сенсорів еволюціонують також методи збору даних, зокрема із застосуванням RGB та RGB-D камер, і ускладнюються процедури 3D-реконструкції. Для забезпечення повноцінного голографічного зв'язку усі зафіксовані об'єкти підлягають тривимірній реконструкції. Це може здійснюватися за допомогою систем на основі зображень (із фіксацією з різних кутів) або з використанням об'ємного відео. У випадку зображень система формує набір знімків, що зберігаються у вигляді послідовності кадрів. Інший підхід базується на моделюванні об'єкта через набір точок у просторі, що містять просторову та поверхневу інформацію.

Після запису голографічної копії за допомогою спеціалізованих камер, контент підлягає попередній обробці перед етапом стиснення. У разі використання багатокамерних систем (наприклад, для зйомки об'ємного відео), отримані потоки необхідно об'єднати в уніфіковане представлення. Для зниження обчислювального навантаження на серверну інфраструктуру перевага надається прямому використанню хмар точок. Існують два основні підходи до реалізації стиснення та передавання хмари точок: обробка неструктурованих 3D-даних або їх конверсія у формат глибинних зображень. У другому випадку можливе використання схожих методів кодування, як і для традиційних 2D-

відео. Проблема стиснення пов'язана з високою щільністю даних: кожна точка (а їх може бути понад мільйон у кадрі) містить координати (x , y , z) і характеристики поверхні (наприклад, колір, текстуру). Для ефективної передачі таких даних необхідні адаптивні методи стиснення. Дослідження доводять, що ефективність методів стиснення хмари точок істотно впливає на якість сприйняття. У тестах якості користувачі оцінюють рівень реалізму реконструкцій, підтверджуючи кореляцію між об'єктивними та суб'єктивними метриками при потоковій адаптації. Крім зменшення обсягу даних, стиснення повинно забезпечувати можливість вибіркового доступу до контенту. Необхідно також вирішити питання просторової сегментації [16].

Для досягнення ефекту присутності (QoE) критичною є синхронізація усіх даних. Відсутність синхронізації порушує цілісність візуального сприйняття, знижуючи ступінь іммерсивності. Отже, важливо забезпечити не лише ефективне стиснення, а й гарантовану узгодженість, своєчасність доставки й високу якість обслуговування (QoS). Системи голографічного телеприсутності мають бути здатні до селективного декодування, тобто обробляти лише ті частини голографічного контенту, які запитуються користувачем. Це суттєво знижує вимоги до пропускної здатності мережі, але водночас потребує оптимального балансу між якістю та ефективністю стиснення. Основним викликом залишається досягнення високого ступеня стиснення при мінімальній затримці, особливо у випадках реального часу. Ще одним важливим аспектом є передавання даних. Проблема забезпечення високоякісного голографічного зв'язку із прийнятним рівнем відтворення на стороні користувача є ключовою у наукових дослідженнях. Масове впровадження голографічних сервісів напряду залежить від можливостей мереж підтримувати інтерактивну трансляцію відеоголограм у реальному часі. У той час як пікові швидкості у 3G та 4G становлять відповідно 21 Мбіт/с та 100 Мбіт/с, у практиці реальні показники часто нижчі. Технологія 5G забезпечує до 20 Гбіт/с, що є прийнятним для потокового всенаправленого відео, але недостатнім для повноцінної голографії. Очікується, що 6G, із піковими швидкостями до 1 Тбіт/с, стане основою для

масового впровадження голографічного зв'язку. На думку дослідників, телекомунікаційна інфраструктура повинна підтримувати динамічну реконфігурацію та адаптивність до різних сценаріїв застосування. Оскільки передавання повноцінного тривимірного зображення вимагає значних ресурсів, зростання навантаження на мережі є неминучим. Голографічна комунікація передбачає доставку цифрового 3D-контенту в режимі реального часу від одного чи декількох джерел до кінцевих вузлів, створюючи серйозні виклики для телекомунікацій майбутнього [17].

1.5 Аналіз та технічні параметри апаратного забезпечення для систем голографічної комунікації

У процесі дослідження голографічного типу комунікацій доцільно комплексно розглядати не лише загальні принципи функціонування таких систем, а й питання, що стосуються апаратного забезпечення, зокрема засобів для запису голографічної інформації та її відтворення. Слід відзначити, що на ринку телекомунікацій постійно з'являється нове обладнання для реалізації голографічних технологій з удосконаленими технічними характеристиками, що, у свою чергу, стимулює інтенсивний розвиток і впровадження нових послуг зв'язку для кінцевих користувачів.

Передача інформації в умовах сучасного комунікаційного середовища традиційно розглядається з позиції вирішення двоетапної задачі: фіксації (запису) даних та їх подальшого відтворення. Інноваційні голографічні технології забезпечують якісний перехід на новий рівень високотехнологічних методів представлення просторово-часової інформації, завдяки чому відкриваються нові горизонти в сфері тривимірної комунікації. Принципова структура голографічних систем залишається ідентичною класичній голографії та включає дві основні фази: фазу запису та фазу реконструкції (відтворення). Проблемам точного запису інформації та створення голографічних зображень, що максимально відповідають реальним об'єктам, присвячено значну кількість

наукових праць. Посилено проводяться дослідження як в області технологій запису, так і в напрямку вдосконалення обладнання — 3D-відеокамер та інших сенсорних пристроїв. Записуюче обладнання, яке використовується для цифрового представлення тривимірних об'єктів, зазвичай формує колірне зображення за допомогою трьох світлових компонентів (червоний, зелений, синій — Red, Green, Blue) з різною інтенсивністю. Сучасні пристрої типу RGB-D (Red-Green-Blue-Depth) дозволяють кожному пікселю одночасно присвоїти два параметри — колірне значення та координату глибини, що забезпечує високоточну цифровізацію просторових характеристик об'єктів та середовищ.

Для відтворення таких тривимірних зображень на сучасному етапі розвитку голографічних технологій розроблено апаратуру, здатну забезпечувати реалістичну просторову візуалізацію без необхідності використання спеціальних окулярів чи позиціювання користувача у визначеному місці. Цифрові голограми, як правило, складаються з великої кількості пов'язаних між собою зображень, які відображають рух об'єкта у часі та просторі, формуючи повноцінну 3D-візуалізацію. Основними елементами голографічних телекомунікаційних систем є модулі збору, передавання та візуалізації інформації. Одним із ключових індикаторів зростаючого потенціалу впровадження голографічних технологій у сферу зв'язку є активізація наукових досліджень у напрямку розробки високотехнологічного обладнання для запису та відтворення тривимірних зображень [18].

Одним із перших етапів при створенні голографічної комунікації є визначення методів збору даних, їх класифікація, технічні особливості та сфери застосування. Для забезпечення повноцінної голографічної взаємодії необхідно, щоб усі об'єкти сцени були представлені у тривимірному форматі. З цією метою застосовуються два основні підходи до захоплення контенту: технології, засновані на об'ємному відео, та методи, що базуються на послідовності зображень.

Технологія об'ємного відео (Volumetric Video) передбачає подання об'єкта у вигляді набору дискретних точок у тривимірному просторі, кожна з яких

містить геометричну (координати x , y , z) та текстурну інформацію (наприклад, у форматах YUV або RGB). Така форма представлення утворює хмару точок — сукупність даних, що дозволяє візуалізувати об'єкт з будь-якого ракурсу, забезпечуючи високий рівень реалістичності. Хмара точок може бути доповнена полігональними сітками — трикутними сітковими структурами, які формують тривимірну поверхню об'єкта. Вершини таких сіток мають координати, що використовуються для графічного рендерингу в залежності від положення та кута огляду користувача. Незважаючи на те, що хмари точок краще справляються з відображенням складних форм та відсутністю даних (порожнин), сітки більш ефективні для графічних конвеєрів, зокрема завдяки підтримці методів оптимізації візуалізації, таких як MIP-карти та анізотропна фільтрація. MIP-карти (Multum in Parvo) — це ієрархія текстур різної роздільної здатності, призначена для підвищення продуктивності при масштабуванні об'єктів. Анізотропна фільтрація покращує якість текстур при косому куті огляду або великій віддаленості, що дозволяє досягати високої чіткості та деталізації зображення навіть за умови високого бітрейту. Ці властивості роблять сітки придатним інструментом у графічно насичених застосунках, хоча вони поступаються хмарам точок у гнучкості обробки.

Для визначення глибини (відстані до об'єкта) найбільш поширеними є два методи: триангуляційний підхід та метод вимірювання часу проходження сигналу (Time-of-Flight, ToF). У межах триангуляції використовуються пасивні та активні системи.

Пасивна триангуляція, або стереозір, базується на аналізі двох зображень, отриманих з різних точок зору. Порівнюючи ці зображення, система визначає паралакс і на його основі розраховує глибину сцени. Такий підхід імітує механізм сприйняття глибини у людини. Активні системи, як-от структуроване світло (Structured Light), застосовують проєкцію інфрачервоних візерунків на об'єкт. Відстежуючи викривлення цих візерунків, спричинені рельєфом поверхні, система може з високою точністю реконструювати форму об'єкта. Відмінністю структурованого світла від стереозору є використання активного

джерела освітлення, що не залежить від зовнішніх умов. Метод ToF реалізується за допомогою лазерних систем LIDAR та ToF-камер. LIDAR (Light Detection and Ranging) використовує лазерні імпульси для сканування простору. Повернення відбитого променя до сенсора дає змогу точно розрахувати відстань до об'єкта. Системи LIDAR зазвичай мають механічні елементи, наприклад, обертові дзеркала, що забезпечують охоплення великої частини сцени. ToF-камери, побудовані на базі CMOS або CCD-матриць, вимірюють час проходження імпульсу від джерела до об'єкта та назад. Отримані дані формують карту глибини сцени. Перевагами ToF-сенсорів є висока швидкодія, точність та можливість застосування у реальному часі, що особливо актуально для систем розпізнавання жестів, автономного транспорту та доповненої реальності.

Для реалізації голографічного зв'язку необхідно провести сканування об'єкта, яке передуює процесу передавання даних мережею. Як зазначено у [19], існують різні методи створення 3D-голограм:

- Аналоговий метод, що використовує лазерне сканування;
- Цифрові підходи з використанням програмного забезпечення для 3D-моделювання (наприклад, Blender, 3Ds Max, CINEMA 4D);

Цифрове сканування із застосуванням 3D-сканерів, що базуються на різних технологіях: Structured Light, Time-of-Flight, Depth from Stereo, Light Field та LIDAR.

Серед сучасних технічних засобів, що забезпечують захоплення просторової інформації для голографічного відтворення, значну роль відіграють камери глибини, які базуються на стереозірковій технології та методах вимірювання глибини на основі часу проходження імпульсу (Time-of-Flight, ToF). Важливими представниками цього класу пристроїв є камери Intel® RealSense™ серії D400 та Microsoft Kinect.

Камера Intel® RealSense™ D457 розроблена для високопродуктивних застосувань, де необхідна висока точність просторового захоплення. Вона використовує стереоскопічну технологію вимірювання глибини, що забезпечує

визначення відстані до об'єктів у діапазоні від 0,52 м до 6 м із точністю менш ніж 2% на відстані 4 м. Основні технічні характеристики:

- Інтерфейс: Підтримка інтерфейсу GMSL/FAKRA з вбудованим чипом-серіалізатором Maxim для передачі великого обсягу даних.

- Роздільна здатність:

- Потік глибини: до 1280×720 пікселів при частоті до 90 кадрів/с.

- RGB-сенсор: 1-мегапіксельний сенсор із глобальним затвором (1280×800 пікселів, 30 кадрів/с, кут огляду 90°×65°).

- Форм-фактор: 124×29×36 мм — компактні розміри, що спрощують інтеграцію в автономні платформи, роботи та промислові системи.

Камера D415 — це компактний пристрій із USB-інтерфейсом, оптимізований для високоточної передачі глибини. Вона оснащена двома сенсорами глибини, RGB-камерою та інфрачервоним проектором, що дозволяє отримувати достовірні 3D-карти сцени.

- Обчислювальний модуль: Візуальний процесор, виготовлений за 28-нм технологічним процесом, підтримує до п'яти інтерфейсів MIPI для обробки зображень у реальному часі.

- Алгоритм стереозору: Покращений алгоритм обробки глибини забезпечує високу точність при роботі на великих дистанціях.

- ІЧ-підсвітка: Вбудований інфрачервоний проектор дозволяє ефективно працювати за умов низької освітленості або на складних текстурованих поверхнях.

- Роздільна здатність і точність: глибина — до 1280×720 пікселів; RGB — до 1920×1080 пікселів.

- Діапазон глибини: від 0,45 м до 3 м з похибкою менше 2% на відстані 2 м.

- Фізичні параметри: 99×20×23 мм, роз'єм USB-C 3.1 Gen 1, кріплення — різьби ¼ 20 UNC та M3.

Перше покоління камери Kinect (2009 р.) створене для захоплення рухів та побудови 3D-моделей за допомогою технології структурованого світла. У 2011

році вихід SDK забезпечив можливість інтеграції пристрою в наукові дослідження.

- Компоненти:
- RGB-камера VGA (640×480 пікселів, 30 кадрів/с).
- Інфрачервоний лазерний проектор для створення структурованого світлового шаблону.
- CMOS-інфрачервона камера для зчитування деформацій шаблону.
- Мікрофонний масив із частотою дискретизації 16 кГц.
- Сервомеханізм для автоматичного нахилу.
- Принцип побудови глибини: ІЧ-сітка проектується на сцену, і її спотворення аналізується для формування карти глибини. Результати обробляються чипом PrimeSense, який генерує точкову хмару.

Модифікована версія Kinect (2014 р.) базується на ToF-технології, яка забезпечує точніші результати навіть при яскравому освітленні.

- Технологія Time-of-Flight:
- ІЧ-випромінювач проектує модуляційний сигнал.
- Сенсор фіксує відбите випромінювання.
- Вимірюється фазовий зсув для обчислення глибини.
- Технічні параметри:
- Карта глибини: 512×424 пікселів у діапазоні 0,5–4,5 м.
- RGB-зображення: роздільна здатність 1920×1080 пікселів (Full HD).
- Переваги: стійкість до зовнішніх джерел світла, зокрема сонячного, що дозволяє використовувати пристрій у відкритому просторі.

Фаза відтворення голографічної інформації, яка безпосередньо пов'язана з початковою фазою – фазою запису, наразі є об'єктом активних науково-технічних досліджень [20]. Розглянемо докладніше другу фазу голографічного процесу – фазу реконструкції. Для реалізації процедури відтворення відеозображення голографічного типу застосовуються різноманітні технічні засоби. У межах дослідження, присвяченого проблематиці передавання трафіку голографічних копій, під час побудови експериментальної моделі, було

поставлено завдання аналізу технічних характеристик відповідного обладнання та обґрунтування його вибору. Особливу увагу у цьому контексті привертають голографічні вентилятори та лазерні проектори [21].

Так звані голографічні вентилятори є пристроями з лопатями, вздовж яких розміщені світлодіоди. Під час швидкого обертання лопатей світлодіоди синхронізуються з частотою обертання, що створює візуальний ефект просторового зображення. Завдяки інерційності зору людини, ефект обертання не сприймається, а зображення візуалізується як об'ємне, нібито "висяче" у повітрі. Функціонування лазерних проекторів базується на принципі синтезу зображення шляхом модуляції й розгортання лазерних пучків основних кольорів (R, G, B) [22]. Для створення тривимірної голограми необхідні дві хвилі: опорна та об'єктна. Опорна хвиля взаємодіє з голограмою, створеною в процесі запису, спричиняючи дифракцію, внаслідок чого відтворюється хвильовий фронт об'єктної хвилі, що й формує голографічне зображення. Як зазначає Ю.Ю. Чопорова: «Щоб відновити зображення об'єкта, голограму необхідно освітити опорною хвилею – у результаті дифракції на голограмі відтворюється хвильовий фронт об'єктної хвилі, і з'являється зображення об'єкта» [23].

Для генерації хвиль використовуються спеціалізовані лазери, а інтерференція, що виникає внаслідок їх накладання, створює тривимірне зображення. Розвиток потужних напівпровідникових лазерів у поєднанні з технологією цифрової обробки світла (DLP) на основі мікродзеркальних модуляторів забезпечив створення нового покоління лазерних голографічних проекторів. У таких пристроях джерелами світла виступають лазери червоного (615,25 нм), зеленого (532,5 нм) і синього (465 нм) діапазонів [24].

Голографічна проекційна технологія поєднує принципи 3D-візуалізації з голографією, що дозволяє не лише фіксувати й відтворювати тривимірні зображення з високою точністю, але й реалізовувати функції цифрової мікроскопії, реконструкції просторових структур, мікроскопічного аналізу об'єктів і відновлення втрачених частин зображення [25].

У межах цього дослідження були проаналізовані технічні параметри наступних пристроїв:

- Голографічний лазерний проектор LG CineBeam HF85LSR
- Голографічні вентилятори DseeLab-65H та N20
- Лазерні проектори Samsung The Premiere LSP7T (120") і LSP9T (130")

Цей лазерний проектор з підтримкою 3D демонструє яскраве зображення незалежно від рівня освітлення приміщення. Джерелом світла є лазерний діод з яскравістю 1500 люмен і ресурсом роботи понад 20 000 годин. Споживана потужність у робочому режимі – 140 Вт. Завдяки ультракороткофокусному об'єктиву зображення діагоналлю 90" можливо проектувати з відстані всього 8 см від поверхні. Підтримується декілька форматів кадру: 16:9, Original, 4:3 та режими масштабування. Інноваційною характеристикою є технологія компенсації руху MEMC (Motion Estimation/Motion Compensation), яка забезпечує плавність зміни кадрів і корекцію трапецеїдальних спотворень як по вертикалі, так і по горизонталі. У пристрої реалізовано два HDMI-входи (один з ARC), LAN-порт, аналоговий аудіовихід 3,5 мм, оптичний вихід і вбудовану акустичну систему (2×3 Вт) зі стереоефектом. Також підтримуються звукові кодеки Dolby Surround Audio і DTS-HD, а керування можливе через Wi-Fi. Передача AV-контенту реалізована за допомогою функції Screen Share. Габарити – 353×118×189 мм, вага – 3 кг. Цей лазерний проектор має роздільну здатність 3840×2160 (4K UHD), пікову яскравість 2200 люмен і потужність 320 Вт. Контрастність – 1000:1 (звичайна), 2 000 000:1 (динамічна), підтримується технологія покращення контрасту (Contrast Enhancer) і чіткості швидких сцен (Auto Motion Plus). Акустична система потужністю 30 Вт із двома каналами підтримує адаптивний звук, функції покращення діалогу (Dialog Enhancement) і передачі аудіо до інших кімнат (Multiroom Link). Передача звуку можлива через Bluetooth. Робочий шум – до 32 дБ. Габарити – 532×132,7×342 мм.

Проектор преміум-класу з трьома лазерними джерелами світла, піковою яскравістю до 2800 люмен (ANSI) і споживаною потужністю 410 Вт. Контрастність – до 1500:1 (нормальна) і 2 000 000:1 (динамічна). Підтримуються

режими покращення зображення: Contrast Enhancer, Auto Motion Plus, Filmmaker Mode. Звукова система складається з чотирьох каналів із сумарною потужністю 40 Вт, включає динаміки типу Hole Array Speaker, а також функції покращення діалогу. Пристрій підтримує Wi-Fi 5, Bluetooth 4.2, HDMI Quick Switch, Anynet+ (HDMI-CEC). Енергоспоживання – 410 Вт, у режимі очікування – 0,5 Вт. Габарити – 550×141×367 мм, вага – 11,5 кг.

Усі розглянуті проектори належать до класу ультракороткофокусних пристроїв. Однак модель Samsung 130" 4K The Premiere LSP9T має низку переваг, які вирізняють її серед аналогічних рішень. Зокрема, для перегляду зображення не вимагається повне затемнення приміщення — достатньо часткового приглушення світла. Це пояснюється тим, що проектор забезпечує зображення на 12% яскравіше, ніж інші ультракороткофокусні аналоги. Такий результат досягається завдяки застосуванню технології трикратного лазерного випромінювання**, яка забезпечує пікову яскравість на рівні 2800 люмен.

У рамках аналізованої вибірки пристроїв найкомпактнішим виявився лазерний проектор LG CineBeam HF85LSR, що робить його придатним для використання в умовах обмеженого простору. Завдяки вазі лише 3 кг, пристрій зручно транспортувати, що розширює сферу його застосування. Загальний аналіз показав, що всі розглянуті моделі забезпечують якісну візуалізацію завдяки використанню високояскравих світлодіодів, підтримують дистанційне керування, мають спеціалізоване програмне забезпечення для інтеграції з персональним комп'ютером або ноутбуком, дозволяють охопити широку площу проєкції і оснащені слотом для SD-карт, що забезпечує зручне оновлення мультимедійного контенту. На підставі порівняльної оцінки характеристик можна виокремити голографічний лазерний проектор LG CineBeam HF85LSR як один з найкращих варіантів. Він забезпечує яскраве та контрастне зображення, практично не залежить від характеристик поверхні, на яку проєктується зображення, і має тривалий ресурс джерела світла — до 20 000 годин. До недоліків пристрою можна віднести ефект мерехтіння, надмірну насиченість

кольорів, що може сприйматись як неавтентична, а також високу вартість, що може обмежити його широке впровадження.

Голографічний вентилятор є пристроєм для візуалізації тривимірних зображень, який створює ефект «плаваючої» у повітрі голограми. Завдяки високій частоті обертання лопатей, на яких розміщено високощільні світлодіодні (LED) пікселі, людське око не здатне сприймати самі лопаті. У результаті спостерігається ефект об'ємного зображення, що візуально «зависає» в повітрі, без потреби в проєкційній поверхні, на відміну від традиційних голографічних проєкторів. Технологія функціонування вентилятора базується на принципі безперервного обертального руху та ефекті Persistence of Vision (POV) — зорової стійкості. У процесі обертання світлодіоди швидко вмикаються і вимикаються відповідно до сигналів, що надходять з вбудованого мікропроцесора з точно визначеною частотою. Така швидка зміна світлових сигналів людським зором сприймається як цілісне динамічне зображення з високою яскравістю та насиченістю кольору. Виробниками створено моделі голографічних вентиляторів із різним діаметром: 50 см, 60 см, 65 см і 100 см, що визначає максимальний розмір проєкції, оскільки діаметр вентилятора фактично відповідає діаметру виведеного зображення. У рамках дослідження було проаналізовано голографічний вентилятор DseeLab-65H, діаметр якого становить 65 см. Пристрій забезпечує роздільну здатність 720×720 пікселів та енергоспоживання на рівні 48 Вт у робочому режимі. Конструкція з чотирма лопатями, що обертаються зі швидкістю 1200–1500 об/хв, дозволяє створювати яскраві, динамічні голографічні зображення в повітрі. Серед ключових переваг пристрою також варто відзначити відносно низьке енергоспоживання — у межах 30–50 Вт, залежно від режиму експлуатації.

Креативний підхід до розробки нових пристроїв на основі голографічних технологій демонструє високий потенціал цього напрямку. Сучасні голографічні візуалізаційні технології забезпечують формування якісних тривимірних відеозображень з підвищеною яскравістю та деталізацією, що відкриває нові можливості для практичного використання, зокрема у сфері телеприсутності. З

метою реалізації першого етапу даного дослідження було проведено порівняльний аналіз двох пристроїв: голографічного проєктора LG CineBeam HF85LSR та голографічного вентилятора DseeLab-65H. Однією з важливих переваг проєктора є незалежність якості зображення від геометрії поверхні, на яку здійснюється проєкція. У свою чергу, вентилятор не потребує жодної поверхні для виведення візуального контенту, що розширює сферу його застосування в умовах мобільних або інтерактивних презентацій. Подальший розвиток комунікаційних технологій, зокрема у сфері голографічного відеозв'язку, відкриває перспективи створення ефекту присутності співрозмовника у віртуальному просторі, що є актуальним завданням для систем зв'язку наступного покоління (5G/6G).

Голографічні станції розглядаються як апаратно-програмні засоби для відтворення тривимірних зображень, які формують ілюзію об'ємної візуалізації в межах спеціалізованої конструкції без необхідності використання спеціальних окулярів. Залежно від конструктивного виконання та принципу дії, виділяють голографічні 3D-піраміди та 3D-куби. Голографічні піраміди мають напівпрозорі грані, на внутрішні сторони яких за допомогою вбудованого дисплея (розміщеного у верхній частині конструкції) проєктується відеозображення. Завдяки оптичним властивостям матеріалів та геометрії піраміди, кожне око спостерігача сприймає індивідуальний кут проєкції, що забезпечує ефект голографічної об'ємності. Таке рішення дає змогу досягти яскравого, деталізованого зображення, видимого з кількох сторін одночасно, що значно підсилює візуальний ефект присутності [26].

Голографічні куби — це об'ємні пристрої з прозорими або напівпрозорими гранями, всередині яких розташовані джерела світла (найчастіше — світлодіоди). Кожна грань куба відображає частину цілісної сцени, формуючи центральне об'ємне зображення, яке сприймається як візуально «плаваюче» в повітрі. У порівнянні з пірамідою, куб забезпечує обмежений кут огляду — зазвичай спереду та ззаду. Спеціальне оптичне покриття на гранях та використання темного тла додатково підсилюють ефект глибини.

У сучасній практиці голографічні станції активно застосовуються в рекламних кампаніях, виставках, демонстраційних проєктах, музеях, лекційних залах та інших освітніх заходах. Нижче наведено огляд окремих моделей голографічних пристроїв, які продемонстрували високу ефективність у різних сферах. Wizard Holographic Cube — це інноваційна голографічна система, розроблена для доповнення реальних об'єктів візуальним 3D-контентом, включно з анімованими сценами, що генеруються за допомогою спеціального програмного забезпечення. Завдяки можливості індивідуального налаштування ПЗ, пристрій адаптується під різноманітні завдання — від освітніх і науково-популярних до маркетингових і культурно-просвітницьких презентацій. HighPyramide 3D Pyramid (трестороння, 55") — це пристрій, орієнтований на візуалізацію тривимірних моделей у музеях, на виставках, форумах, а також як складова голографічної телекомунікації (ГТК). Система підтримує відтворення контенту з флеш-накопичувачів або комп'ютерів, підключених до локальної мережі, та здатна працювати з широким спектром мультимедійних форматів — від анімованих логотипів до рекламних роликів. AxeTech Cube 32" Medium — прозорий голографічний куб, призначений для створення ефекту «плаваючої» у повітрі тривимірної моделі, яка може обертатися у просторі. Дана модель є ефективним рішенням для виставкових заходів, науково-практичних конференцій та презентацій. HighCube — це інтерактивний високотехнологічний голографічний куб із прямокутною конструкцією, де одна з граней використовується для проєкції високоякісної 3D-графіки. Пристрій здатен створювати візуальні сцени з ефектом присутності об'єкта в повітряному просторі. Технічні характеристики дозволяють застосовувати пристрій у складі інтерактивних інсталяцій [27].

1.6 Висновки до розділу 1

Фіксується чітка тенденція до трансформації структури трафіку в телекомунікаційних мережах у бік зростання обсягів мультимедійного та голографічного контенту, що, у свою чергу, висуває на перший план завдання щодо удосконалення інфраструктури зв'язку.

Серед ключових параметрів, які визначають якість обслуговування (QoS) при передаванні голографічного трафіку, виділяються наступні характеристики: низька та наднизька затримка; висока пропускна здатність каналу; мінімальний рівень втрат пакетів. У зв'язку з цим, предмет цього дослідження — моделювання та аналіз трафіку для голографічної передачі даних — набуває особливої актуальності в умовах становлення нового типу комунікацій.

Голографічна комунікація передбачає створення тривимірного зображення співрозмовника, що дає змогу з високою точністю передавати емоції, міміку та жести. Для функціонування таких систем необхідна суттєво більша пропускна здатність, аніж та, яку забезпечують сучасні телекомунікаційні технології. Це вимагає інноваційних рішень у сфері розвитку мережевої інфраструктури та кінцевого обладнання. У підсумку, можна стверджувати, що подальший розвиток голографічних технологій неминуче призведе до зміни вимог до телекомунікаційних мереж. Забезпечення можливості передачі високоякісного голографічного контенту стане можливим лише за умови реалізації інноваційних підходів у проєктуванні мереж наступного покоління. На сучасному етапі вже спостерігається стійке зростання кількості наукових досліджень, які зосереджені на оптимізації пропускної здатності мереж та зменшенні затримок пакетної передачі, що свідчить про високий рівень наукової та технологічної зацікавленості у даному напрямі.

2 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФІКУ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ГОЛОГРАФІЧНИХ КОМУНІКАЦІЙ У МЕРЕЖАХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

2.1 Моделювання агрегованого потоку голографічного трафіку

У даному розділі представлено результати дослідження, отримані на основі розробленої імітаційної моделі. Визначено базові етапи формування та підтвердження висунутої дослідницької гіпотези. Обґрунтовано положення про те, що за умови агрегування великої кількості потоків голографічного трафіку, результуючий трафік набуває властивостей простого потоку.

Наведено дані щодо інтервалів між надходженнями пакетів, часу обслуговування та часу доставки, отримані за допомогою імітаційного моделювання.

Розвиток інноваційних інформаційно-комунікаційних технологій зумовлює потребу у вирішенні нових задач, пов'язаних із передачею інформації в телекомунікаційних мережах. Послідовний розвиток – від формування вимог до мереж для передавання голосових повідомлень до розробки характеристик для забезпечення якісної трансляції відеоконтенту – з високим ступенем імовірності продовжиться у напрямі дослідження умов для ефективної передачі голографічного трафіку.

Відзначається загальносвітова тенденція до активізації наукових досліджень, присвячених впровадженню голографічних типів комунікацій (НТС – Holographic Type Communications). Забезпечення стабільного рівня якості обслуговування при передаванні голографічних копій потребує проведення всебічного аналізу характеристик відповідного трафіку.

Перспективи появи нових видів послуг у процесі подальшого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій набувають все більш чітких окреслень. Питання організації ефективного обслуговування голографічного трафіку поступово переходить із площини теоретичних досліджень до

практичної реалізації та набуває пріоритетного значення в телекомунікаційній галузі.

Метою даного дослідження є побудова моделі обслуговування голографічного трафіку, яка дозволяє оцінити затримку при проходженні пакетів у мережі зв'язку.

Час обслуговування у моделі описується за допомогою аналітичних виразів, отриманих шляхом апроксимації результатів експерименту.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні задачі:

- підібрати відповідні аналітичні вирази, які можуть бути використані для побудови моделі;
- сформувати модель для первинної оцінки характеристик функціонування телекомунікаційної мережі;
- здійснити імітаційне моделювання процесу обслуговування голографічного трафіку із застосуванням змішаних розподілів за різної кількості джерел трафіку;
- підготувати огляд відомих методів апроксимації результатів імітаційного моделювання;
- провести аналіз кінцевих показників, отриманих у результаті моделювання.

2.2 Опис імітаційної моделі

Для дослідження властивостей агрегованого голографічного трафіку були застосовані як аналітичний, так і імітаційний методи моделювання.

Імітаційне моделювання, як універсальний інструмент для кількісної оцінки параметрів функціонування телекомунікаційних мереж, дозволяє реалізувати програму експериментального вивчення властивостей агрегованого трафіку.

Аналітична модель, у свою чергу, дає змогу сформулювати відповідні математичні вирази для розрахунку основних характеристик систем масового

обслуговування, таких як середній час перебування в системі, інтенсивність обслуговування тощо.

Оцінка точності аналітичної моделі здійснюється шляхом порівняння результатів, отриманих у процесі аналітичного та імітаційного моделювання. Співставлення результатів дозволяє встановити ступінь відповідності між аналітичною моделлю та поведінкою системи, змодельованою експериментально, а також розрахувати відсоткову похибку на основі статистичних показників.

На першому етапі дослідження [18] було проведено експеримент, результати якого лягли в основу побудови імітаційної моделі у програмному середовищі AnyLogic [19]. Структурна схема побудованої моделі подана на рис. 2.1 [13].

Ноло {i} – джерела трафіку, параметри яких визначено за результатами натурного експерименту.

Switch – елемент моделі, який імітує комутатор із пропускною здатністю 1 Гбіт/с та здійснює збір статистичних даних щодо сумарного трафіку, що проходить через нього в одиницю часу.

DelayTransfer – елемент, що моделює затримку передавання даних у мережі.

$$D^{transfer} = \frac{V}{C_{ap}}, \quad (2.1)$$

де C_{ap} — пропускна здатність мережі,

V — обсяг зібраних даних.

$$V = u * T, \quad (2.2)$$

де u — середній обсяг згенерованих даних за секунду (Мбіт/с),

T — період збору даних.

DelayDistribution — затримка розповсюдження:

$$D^{distribution} = \frac{d}{k \cdot c}, \quad (2.3)$$

де k — коефіцієнт поширення,

c — швидкість світла,

d — відстань між вузлами або між останнім вузлом і кінцевим користувачем.

Цей параметр моделі визначає часову затримку, пов'язану з поширенням (передачею) трафіку в мережі від джерела до пункту призначення. Затримка розповсюдження може залежати від топології мережі, фізичних відстаней, типу середовища передавання, а також від характеристик каналу (наприклад, швидкості розповсюдження сигналу). Позначення TS та TE використовуються для визначення часу обробки в системі, тобто фіксації моментів початку (TS, Time Start) та завершення (TE, Time End) обробки пакету в моделі.

Результати проведеного імітаційного моделювання дозволили сформулювати гіпотезу про те, що агрегований потік, утворений з певної кількості потоків голографічного трафіку, набуває властивостей простого потоку. На рисунку 2.1 представлено створену імітаційну модель, реалізовану в програмному середовищі AnyLogic.

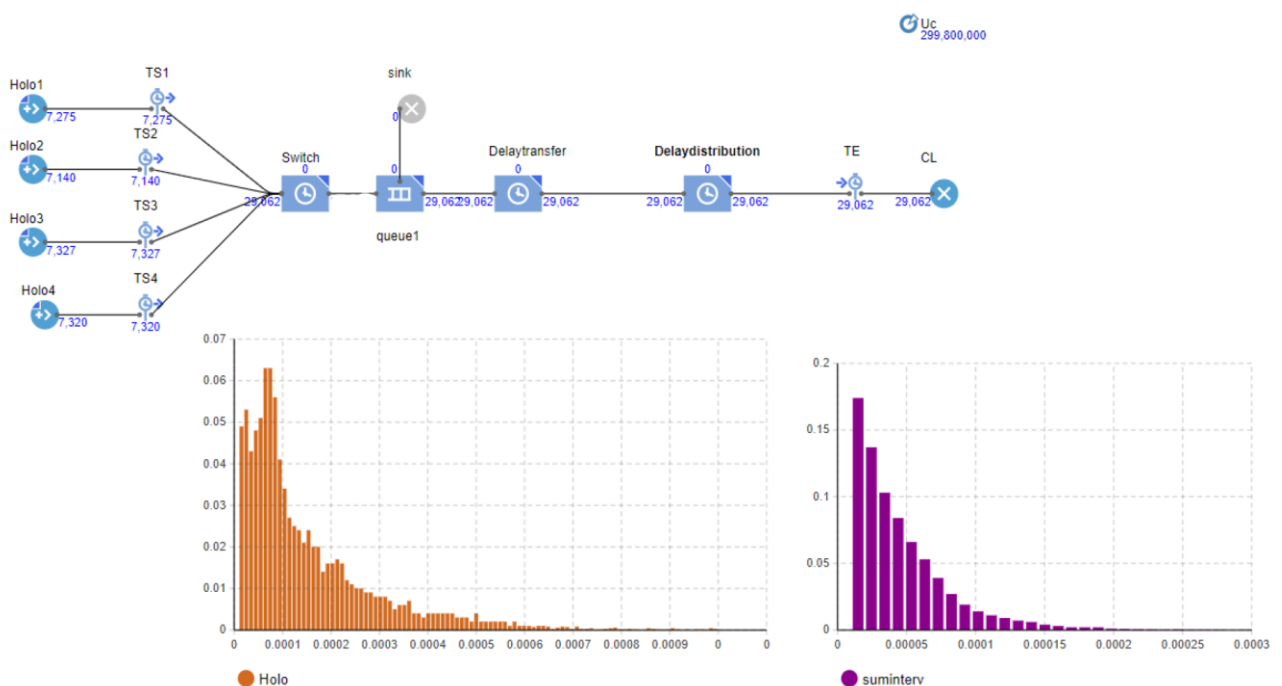


Рисунок 2.1 – Функціональна модель системи в середовищі моделювання AnyLogic

Аналізуючи гістограму агрегованих потоків голографічного трафіку, можна сформулювати припущення, що отриманий потік набуває властивостей простого (елементарного) потоку. Для обґрунтування цього припущення була застосована теорема Пальма–Хінчина [15], яка описує умови збіжності агрегованих потоків до простого потоку. Зазначена теорема дає змогу оцінити ступінь збіжності між реальним потоком і його апроксимацією простим потоком, що важливо для аналітичного оцінювання характеристик системи та прогнозування її поведінки.

На основі критерію Пірсона (хи-квадрат) [15] були сформульовані наступні статистичні гіпотези: нульова гіпотеза (H_0): розподіл інтервалів між подіями є експоненціальним; альтернативна гіпотеза (H_1): розподіл інтервалів не є експоненціальним. Далі була побудована гістограма емпіричних розподілів. Наступним етапом стало оцінювання коефіцієнта варіації на основі отриманих статистичних даних. Після цього було виконано обчислення хи-квадрат статистики згідно з відповідною формулою

$$\chi^2_{\text{эмп}} = \sum_{k=0}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (2.4)$$

де O_i — спостережуваний розподіл,

E_i — теоретично очікуваний розподіл.

Критична область для заданого рівня значимості була визначена за допомогою розподілу хи-квадрат із $k - 1$ ступенями свободи (де k — кількість інтервалів). Підставою для статистичного висновку, що підтверджує або спростовує гіпотезу, є таке правило: якщо обчислене значення статистики хи-квадрат потрапляє до критичної області, нульову гіпотезу відхиляють на користь альтернативної. У протилежному випадку нульова гіпотеза не відхиляється.

Наступним етапом дослідження стало моделювання процесу агрегування потоків від різної кількості джерел. На початковому етапі було змодельовано потік, утворений трьома джерелами.

У таблиці 2.1 наведено статистичні характеристики потоку, сформованого з трьох джерел, для $k = 30$ інтервалів. Показано середнє значення, коефіцієнт варіації, інтенсивність надходження λ , а також середньоквадратичне відхилення.

Таблиця 2.1 – Статистичні характеристики потоку, сформованого з трьох джерел

Назва параметру	Значення
Середнє	0,0000487
Середньоквадратичне відхилення Δ	0,0000478
Коефіцієнт варіації	0,98
λ	20550,76

На рисунку 2.2 представлено графік густини розподілу агрегованого трафіку.

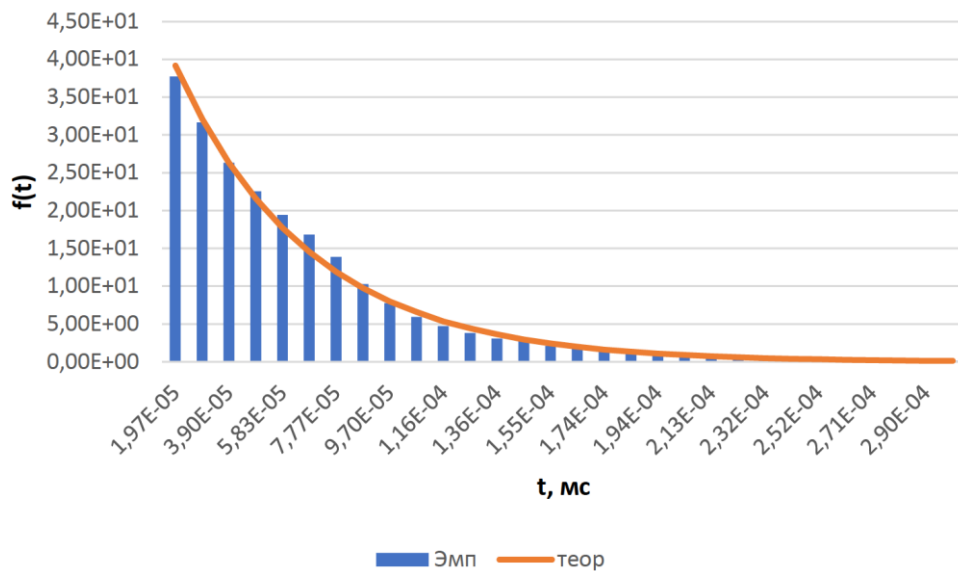


Рисунок 2.2 – Графік густини розподілу агрегованого потоку, сформованого трьома джерелами

Отримані результати не підтвердили висунуту гіпотезу на даному етапі, тому їх було оцінено як негативні. У зв'язку з цим, на наступному етапі дослідження до імітаційної моделі було додано ще одне джерело трафіку з метою дослідити вплив збільшення кількості джерел на форму та характеристики агрегованого потоку. Графіки розподілу часових інтервалів і функції густини ймовірності для агрегованого трафіку наведено на рисунку 2.3.

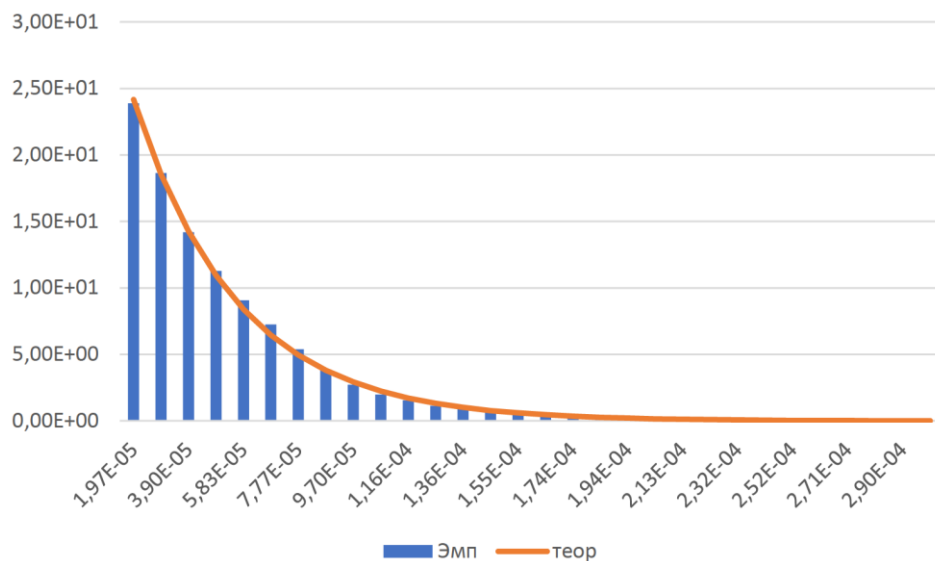


Рисунок 2.3 – Графік густини розподілу трафіку, сформованого чотирма джерелами

Альтернативну гіпотезу підтверджено — розглянуті часові інтервали не мають експоненціального розподілу. У зв'язку з цим у моделі було використано 11 джерел трафіку при кількості інтервалів $k = 30$. На рисунку 2.4 представлено графік функції густини розподілу агрегованого трафіку, сформованого одинадцятьма джерелами.

Варто зазначити, що одинадцять джерел є критичною точкою (межовим значенням), після якої спостерігаються суттєві зміни в характеристиках агрегованого потоку. На наступному етапі моделювання було використано 12 джерел при кількості інтервалів $k = 30$. На рисунку 2.5 зображено графік функції

густини розподілу агрегованого трафіку, сформованого дванадцятьма джерелами.

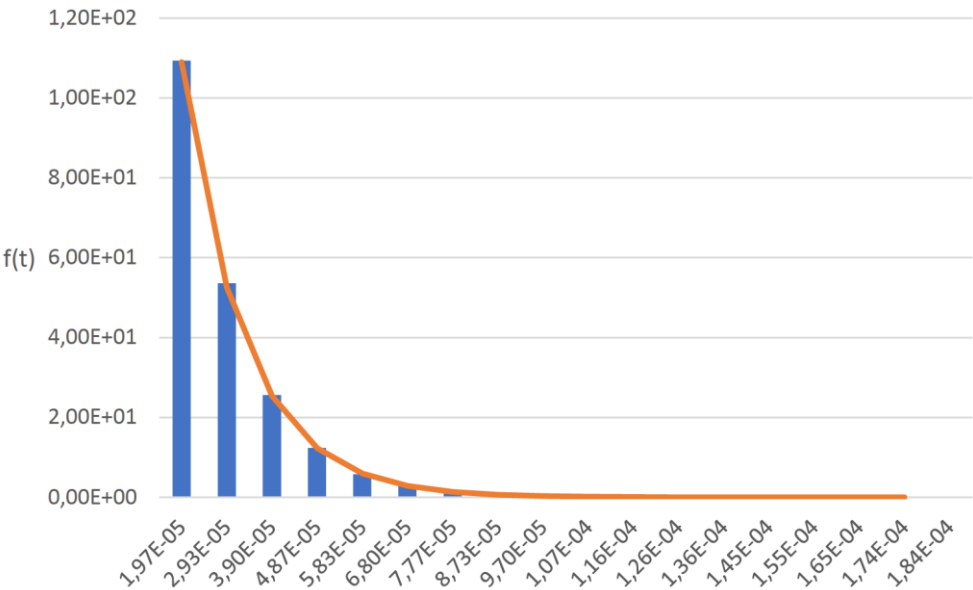


Рисунок 2.4 – Графік розподілу агрегованого трафіку, згенерованого одинадцятьма джерелами

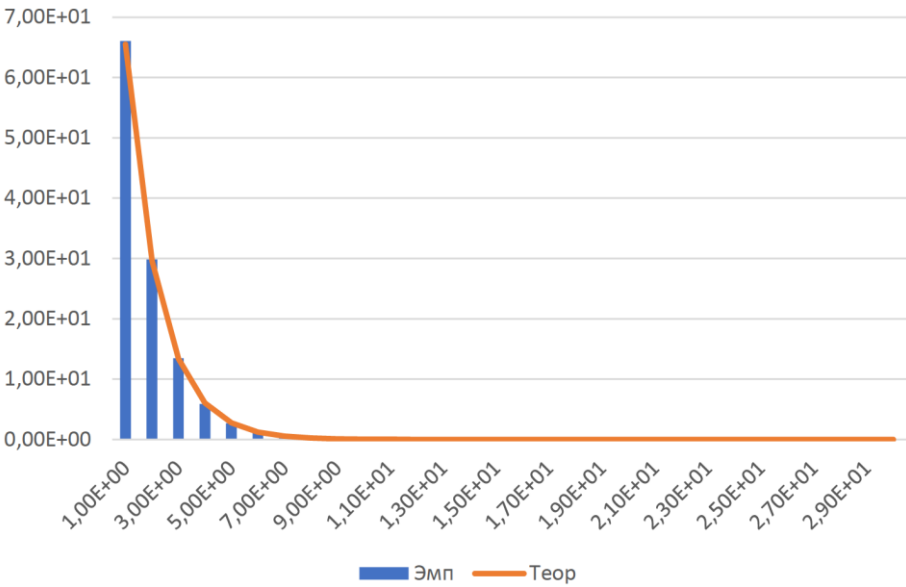


Рисунок 2.5 – Густина розподілу агрегованого голографічного трафіку для 12 джерел

Для підтвердження виявленої тенденції було проведено моделювання з використанням 20 джерел при кількості інтервалів $k=30$. Густина розподілу агрегованого трафіку, сформованого двадцятьма джерелами, подано на рисунку 2.6.

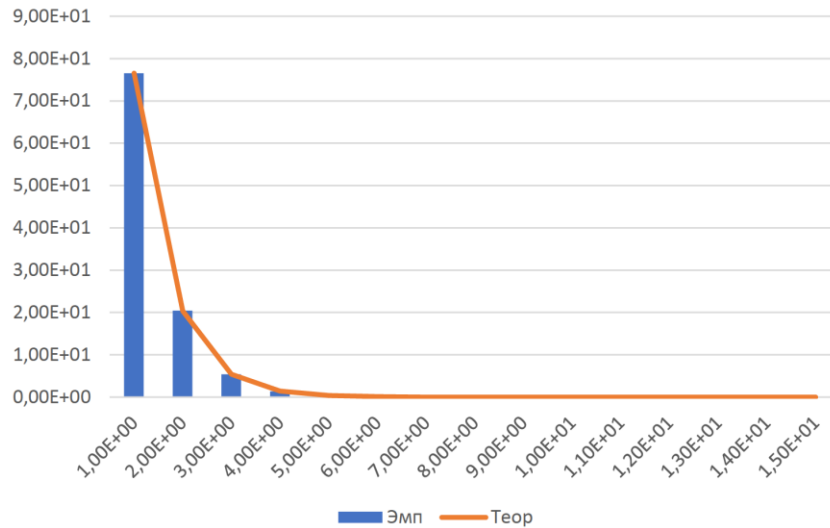


Рисунок 2.6 – Густина розподілу агрегованого голографічного трафіку при 20 джерелах

Отже, можна зробити висновок, що голографічний трафік за умови великої кількості користувачів набуває властивостей простого потоку. Залежність отриманих значень критерію хи-квадрат від кількості джерел наведена на рисунку 2.7.

Для оцінювання затримки в розробленій моделі застосовується формула Поллачека–Хінчина [12]. Ця формула використовується для обчислення характеристик систем масового обслуговування типу $M/G/1$, у яких вхідний потік є пуассонівським, а час обслуговування — довільно розподіленим. У випадку системи $M/G/1$ середній час перебування запиту в черзі позначається як $\bar{W}$, а загальний середній час перебування в системі — як

$$\bar{W} = \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} \left(1 + \left(\frac{\bar{t}}{\sigma_t} \right)^2 \right), \quad (2.5)$$

де ρ — інтенсивність навантаження (коефіцієнт завантаження системи),

t — середній час очікування в черзі,

σ_t — середньоквадратичне відхилення часу очікування в черзі.

$$W = \bar{W} + D_{transfer} + D_{distribution} \quad (2.6)$$

Різниця між результатами, отриманими за аналітичною та імітаційною моделями, яка характеризує відносну похибку моделювання, не перевищує 10 %.

На рисунку 2.8 подано графічне зображення порівняння даних, отриманих за результатами аналітичного та імітаційного моделювання.

Аналіз графіків дозволяє візуально порівняти аналітичну апроксимацію з результатами моделювання, що дає підстави зробити висновки про достовірність аналітичної моделі. Зокрема, видно, як середній час очікування залежить від зміни інтенсивності навантаження на систему обслуговування.

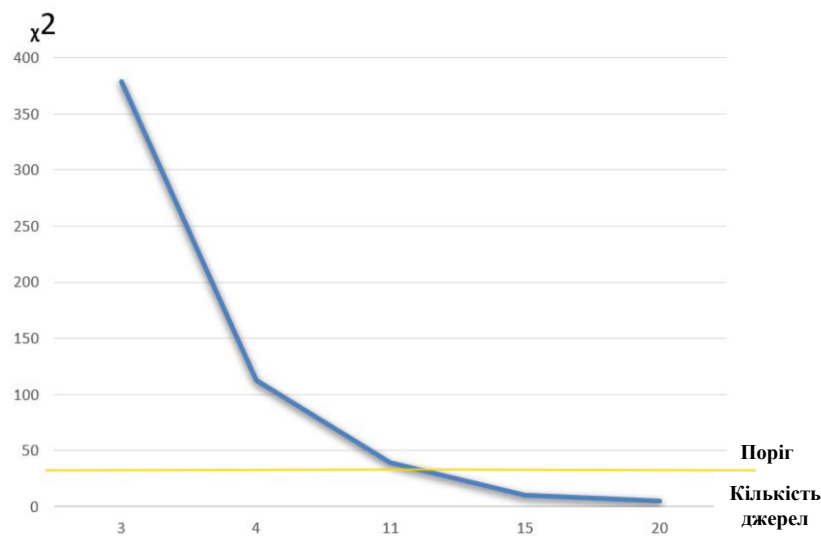


Рисунок 2.7 – Залежність статистики критерію Пірсона від кількості джерел агрегованого трафіку

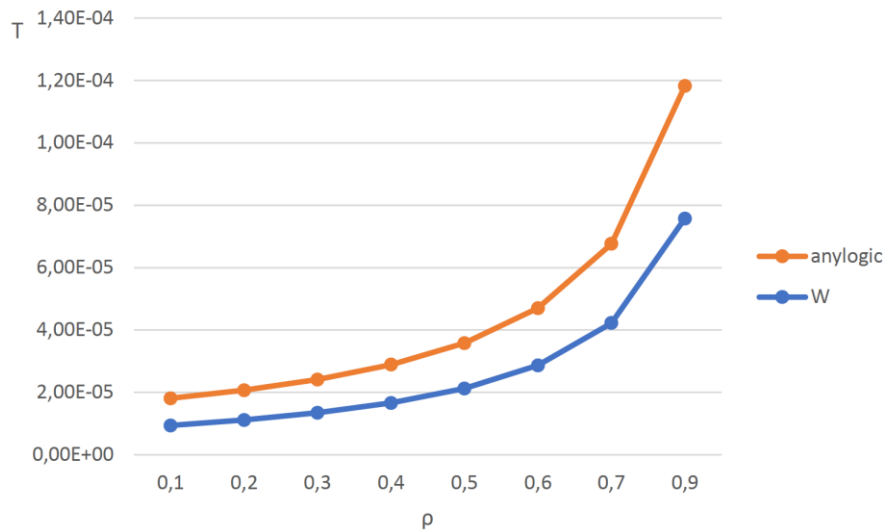


Рисунок 2.8 – Порівняння результатів аналітичної та імітаційної моделей голографічного трафіку

2.3 Моделювання передавання змішаного трафіку

Розміщення обчислювальних серверів (віртуалізованих серверів) ближче до межі мережі радіодоступу дає змогу зменшити затримку при поширенні пакетів даних. Тому час, необхідний для передавання даних до обчислювального сервера, розташованого на межі мережі доступу, як під час збереження зібраної інформації, так і при її подальшій передачі до кінцевого користувача, буде меншим, ніж у випадку використання головного (централізованого) хмарного центру обробки даних. Водночас, ресурси обчислювальних серверів на межі мережі доступу істотно обмежені порівняно з головним хмарним центром (віддаленим ЦОД). У зв'язку з цим виникає необхідність у визначенні критеріїв вибору обчислювального середовища для зберігання даних. Основними критеріями вибору хмарної інфраструктури для збереження даних можуть бути наступні:

1. Ресурс ємності для зберігання даних. Обчислювальний сервер повинен мати можливість зберігати дані, що надходять від одного пристрою протягом заданого періоду часу.

2. Пропускна здатність обчислювального сервера. Цей параметр має особливе значення при передаванні зібраного трафіку.

3. Затримка передачі даних від обчислювального сервера до кінцевого користувача. Чим менша затримка, тим вища якість обслуговування.

Обчислювальні хмари граничних серверів можуть бути реалізовані на базі мікроплат Raspberry Pi з модулями Wi-Fi 802.11n і вбудованим сховищем обсягом до 32 ГБ. У якості мікросерверів та мінісерверів доцільно розглядати сервери компанії Adlink – моделі MECS-6120 та MECS-7211 відповідно. Зазначені сервери можуть бути оснащені до 4 оптичних модулів зі швидкістю 10 Гбіт/с і підтримувати обсяг зберігання від 2 до 8 Тбайт.

У таблиці 2.2 наведено максимальний період зберігання даних від одного пристрою, який забезпечують обчислювальні хмари для мультимедійного та голографічного трафіку [17, 18].

Таблиця 2.2 – Максимальна тривалість зберігання даних, отриманих від одного пристрою

Трафік		Максимальний термін зберігання, годин		
Тип	Необхідна мінімальна пропускна здатність, Мбіт/с	Rasbery PI, 32 GB	Мікро сервер, 2TB	Міні сервер, 8TB
Мультимедіа	1,9	4,79	306,6	1226,41
Голографічний	54	0,17	10,79	43,15

Вибір сервера для подальшого зберігання даних пропонується здійснювати із використанням мережевого оркестратора, який може бути розміщений на головному сервері. Оркестратор також відповідає за визначення навантаження, створюваного трафіком, що надходить на зберігання.

На цьому етапі дослідження розглядався випадок, коли дані від одного пристрою за обраний часовий інтервал зберігалися в одному обчислювальному хмарному середовищі.

Було запропоновано здійснювати вибір сервера на основі критерію мінімальної середньої затримки передачі даних до кінцевого користувача, за умови, що обчислювальний сервер володіє достатніми ресурсами для збереження повного обсягу даних, які генерує одне пристрою за заданий період часу. Для реалізації цього критерію необхідно попередньо оцінити обсяг трафіку, що генерується кожним пристроєм протягом відповідного інтервалу.

Загальна затримка передачі даних у цій роботі розглядалася як сума затримки поширення (пропагації) та затримки обробки, яка залежить від пропускної здатності обраного обчислювального середовища.

У програмному середовищі AnyLogic була реалізована імітаційна модель передачі зібраного трафіку на один із чотирьох обчислювальних серверів: мікросервер, граничний сервер, мінісервер і головний сервер.

На рисунку 2.7 зображено структуру розробленої імітаційної моделі.

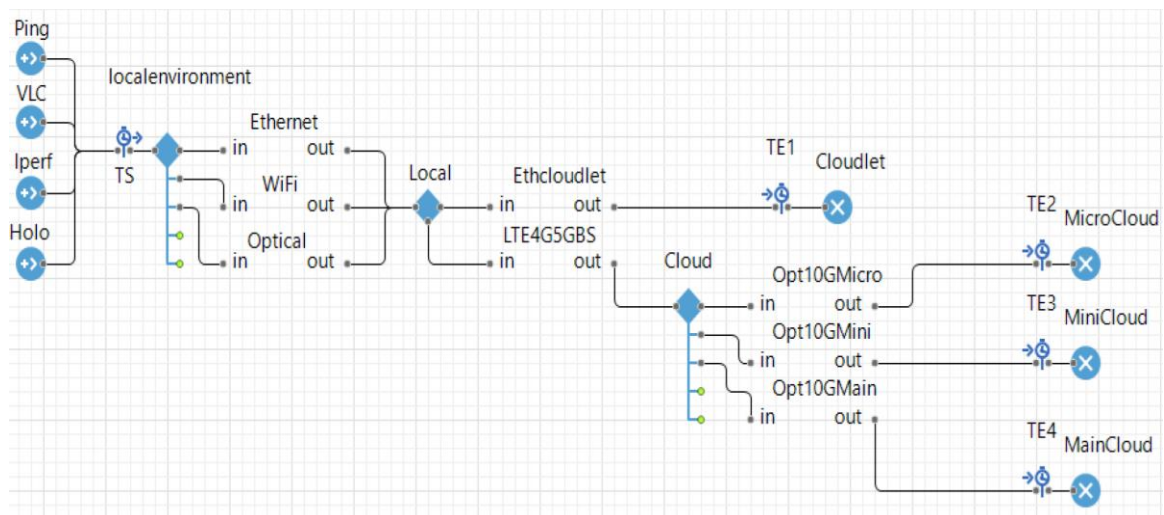


Рисунок 2.7 – Структура імітаційної моделі в середовищі AnyLogic

Як інтервали між запитами для кожного типу трафіку використовувалися раніше визначені розподіли. Передача даних у локальному середовищі

здійснювалася: по Ethernet, оптичному кабелю, Wi-Fi, а також через маршрутизатор 5G до граничного сервера і від базової станції до мікросервера.

Відстань для локальної передачі становила 50 метрів, а пропускна здатність — 100, 150 та 1000 Мбіт/с відповідно.

Передача до Cloudlet-сервера здійснювалася зі швидкістю 1 Гбіт/с.

Передача до базової станції — зі швидкістю 1,55 Гбіт/с на відстань 1,2 км (згідно з результатами тестування компаній NTT DoCoMo та Huawei).

Відстань від базової станції до відповідного сервера обиралася на рівні 50 м, 4 км, 45 км відповідно.

У таблиці 2.3 наведено значення середньої затримки передавання даних до обчислювального середовища для кожного типу трафіку.

Таблиця 2.3 – Середня затримка передавання даних до хмарних обчислювальних середовищ для різних типів трафіку

Тип трафіку	Затримка			
	Граничний сервер	Мікро-сервер	Міні сервер	Головний сервер
Службовий	$1,43 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$	$3,78 \cdot 10^{-5}$	$2,30 \cdot 10^{-4}$
Мультимедіа	$3,64 \cdot 10^{-4}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$3,83 \cdot 10^{-4}$	$5,77 \cdot 10^{-4}$
«Інтернет Речей»	$8,58 \cdot 10^{-5}$	$8,70 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$3,03 \cdot 10^{-4}$
Голографічний	$6,38 \cdot 10^{-5}$	$6,58 \cdot 10^{-5}$	$8,47 \cdot 10^{-5}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
Змішаний	$7,33 \cdot 10^{-5}$	$7,49 \cdot 10^{-5}$	$9,37 \cdot 10^{-6}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$

2.4 Висновки до розділу 2

У результаті проведеного дослідження підтверджено висунуте положення про те, що при агрегації великої кількості потоків голографічного трафіку сформований потік набуває властивостей простого (простейшого) потоку.

Запропоноване моделювання дає змогу оперативно оцінювати продуктивність системи за різних рівнів навантаження, а також виявляти критичні точки, що потребують додаткової оптимізації або масштабування.

У ході роботи була розрахована аналітична модель на основі формули Поллачека–Хінчина для оцінювання характеристик системи масового обслуговування. Побудовано графік порівняння аналітичних і імітаційних результатів, що показав, що відносна похибка не перевищує 10 %.

Отримані результати мають практичну значущість, оскільки можуть бути використані для аналізу голографічного трафіку, прогнозування розвитку інноваційних телекомунікаційних сервісів із урахуванням вимог до якості обслуговування (QoS).

Проведене дослідження також окреслює основні напрямки подальшого вивчення всіх аспектів голографічного типу комунікації. У процесі роботи було проаналізовано динаміку трафіку протягом заданого періоду спостереження.

Отримані дані дали змогу визначити оптимальний варіант вибору сервера для зберігання даних. Узагальнюючи результати, слід відзначити наступне: на сучасному етапі розвитку телекомунікаційних мереж спостерігається стрімке зростання обсягів відеотрафіку. У цьому контексті важливо глибоко розуміти його характеристики та особливості — як для ефективного управління ресурсами мережі, так і для прогнозування подальшого розвитку інфраструктури.

Екстраполяція тенденції до зростання обсягів відеотрафіку (на основі статистичних даних) на голографічний відеотрафік дозволяє зробити обґрунтоване припущення про потенційне зростання цього виду трафіку в майбутньому та необхідність його детального вивчення.

Перспективним напрямком подальших досліджень є поглиблене вивчення властивостей голографічного трафіку, а також розроблення нових математичних моделей систем масового обслуговування (СМО), адаптованих до умов високонавантажених гетерогенних телекомунікаційних середовищ.

3 ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ СПРИЙНЯТТЯ ГОЛОГРАФІЧНОГО КОНФЕРЕНЦ-ЗВ'ЯЗКУ

3.1 Особливості застосування голографічних технологій

Голографічні технології демонструють значну варіативність у використанні, особливо в галузях, що орієнтовані на впровадження інноваційних рішень. У низці сфер діяльності застосування тривимірної візуалізації є критично необхідним, оскільки вирішення значної частини завдань у них потребує використання унікальних методів, які надає голографія.

Зокрема, у відновній хірургії та протезуванні тривимірна візуалізація є ключовим елементом передопераційного планування. Використання 3D-моделей дозволяє підвищити точність хірургічного втручання, зменшити його травматичність, а також знизити ризик виникнення ускладнень, що підтверджується численними клінічними дослідженнями [1]. У сфері протезування голографічні технології забезпечили можливість індивідуалізованого підходу до створення протезів за допомогою 3D-друку, який став ефективною альтернативою традиційним реконструктивним та травматичним операціям [2].

У галузях робототехніки, верстатобудування та машинобудування голографічні технології формують нові підходи до моделювання. Наприклад, у машинобудуванні використовують 3D-моделі для імітації руху промислових роботів [3], а в авіаційній галузі застосовують віртуальні тривимірні моделі для експериментального опрацювання бортових операцій з використанням антропоморфних роботів [4].

У сфері криміналістики, при проведенні ситуаційних балістичних експертиз, застосовується технологія лазерного 3D-сканування. Це забезпечує створення детальної 3D-моделі місця події, що дозволяє слідчим та експертам неодноразово повертатися до неї в незмінному вигляді — з урахуванням навіть найдрібніших слідів та погодних умов [13].

Голографічні технології також активно впроваджуються в проекти оборонно-промислового комплексу. Зокрема, вдосконалюються тренажери та симулятори для підготовки персоналу. В освітній сфері голографія використовується для підвищення якості навчання, хоча повноцінне використання 3D-відео ще не отримало широкого поширення. Початкові розробки демонструють перспективи застосування віртуальних 3D-моделей для вивчення й популяризації масштабних науково-технічних об'єктів [23].

До перспективних напрямів, де можуть застосовуватись голографічні технології, відносяться музейна справа, а також рекреаційні сфери — зокрема індустрія розваг. У музейній практиці вже реалізовано створення ультрареалістичних повнокольорових 3D-копій артефактів, які практично неможливо відрізнити від оригіналів [5]. Водночас, реалізація проєктів у форматі 3D-відео, таких як реконструкція батальних сцен у музейному середовищі, наразі перебуває на концептуальній стадії.

Зростаюча потреба у візуалізації об'єктів у реальному часі за допомогою голографії зумовлює необхідність дослідження властивостей нового типу трафіку, пов'язаного з передачею 3D-відеопотоків [24]. Впровадження інноваційних технологій передусім орієнтоване на досягнення головної мети — підвищення якості життя населення.

У зв'язку з цим критично важливим є забезпечення стабільного рівня обслуговування в телекомунікаційних мережах, оскільки користувачі чутливо реагують навіть на незначні коливання якості [6]. Підвищення ефективності у сферах охорони здоров'я, освіти, виробництва значною мірою залежить від якісної організації інформаційно-комунікаційної інфраструктури.

Інноваційний підхід у сфері комунікацій може бути реалізований через розвиток голографічних типів зв'язку. До пріоритетних напрямів досліджень у сфері розвитку інноваційних процесів в обслуговуванні мереж зв'язку відносяться аналіз характеристик голографічного та мультимедійного трафіків.

Актуальність дослідження потенціалу голографічних технологій та їх впливу на розвиток обчислювальної інфраструктури й телекомунікацій

підтверджується значною кількістю наукових джерел [7-12]. Голографія поступово займає провідне місце серед методів тривимірної візуалізації, що зумовлює зростаючий науковий інтерес до цієї галузі. Спостерігається глобальна тенденція до активізації досліджень щодо впровадження голографічних технологій у різні сфери людської діяльності.

Упродовж останнього десятиліття голографічний конференц-зв'язок перетворився з експериментальної технології на перспективний напрям розвитку засобів візуальної комунікації. На відміну від традиційних систем відеоконференцзв'язку, голографічна передача дозволяє створювати тривимірні зображення учасників у реальному масштабі та в режимі реального часу, що значно покращує ефект присутності.

Суттєвим досягненням у цій галузі стало поєднання голографічного рендерингу з технологіями захоплення руху (motion capture), штучного інтелекту та систем передачі великих обсягів даних з низькою затримкою. Такі рішення вже апробовані у пілотних проєктах компаній Microsoft («Holoportation»), Cisco, а також стартапів, орієнтованих на створення ринку 3D-комунікацій.

Голографічні конференцсистеми базуються на комплексній інфраструктурі, що включає:

- багатокамерні комплекси для об'ємного захоплення зображення;
- алгоритми реконструкції тривимірної моделі в реальному часі;
- інтерфейси візуалізації на голографічних дисплеях або через XR/AR-гарнітури;
- мережі зв'язку з високою пропускнуою здатністю (наприклад, 5G, Wi-Fi 6/6E, перспективно — 6G).

Важливу роль відіграє й опрацювання форматів даних для передачі голографічного відеопотоку, оскільки типові мультимедійні кодеки не пристосовані до тривимірної інформації. Тому ведуться активні дослідження щодо нових стандартів, таких як MPEG-I (Moving Picture Experts Group Immersive), що дозволяє кодувати та передавати віртуальні зображення з просторовим ефектом.

Серед практичних кейсів впровадження голографічного конференц-зв'язку можна виділити:

- віртуальні зустрічі в корпоративному середовищі;
- дистанційне консультування у сфері медицини та освіти;
- застосування в оборонному комплексі для управління операціями;
- міжнародні переговори, де важливою є невербальна комунікація.

Хоча технологія ще знаходиться на етапі формування повномасштабної комерційної інфраструктури, вона вже демонструє високий потенціал. Основні бар'єри — це висока вартість апаратного забезпечення, необхідність спеціальних приміщень для повноцінного 3D-відтворення та складність масштабування мереж передачі даних.

Таким чином, голографічний конференц-зв'язок є стратегічним напрямом розвитку сучасних інформаційно-комунікаційних технологій. Його розвиток безпосередньо пов'язаний із вдосконаленням обчислювальних платформ, підвищенням швидкості мереж передачі даних та створенням стандартів для обробки й передачі тривимірного відео в реальному часі.

Універсальність інноваційного впливу голографічного конференц-зв'язку підтверджується реалізацією численних прикладних і дослідницьких проєктів у цій галузі. Зокрема, розробники запропонували нову систему голографічного спілкування під назвою HoloKinect [26], яка поєднує можливості об'ємного захоплення зображення й передачі його в реальному часі.

Світові технологічні компанії, зокрема Polycom, Cisco та Google, активно просувають концепцію телеприсутності через реалізацію повнофункціональних голографічних рішень. Так, під час конференції Google I/O 2021 було представлено прототип голографічного конференц-зв'язку з високим рівнем реалістичності, що передавав тривимірне зображення співрозмовника в реальному часі [27].

На міжнародній виставці Integrated Systems Europe (ISE) 2023, яка проходила в Барселоні, компанія Logitech продемонструвала власний прототип системи голографічного зв'язку з ефектом присутності. Аналогічну систему було

інстальовано в корпоративному офісі компанії Steelcase у штаті Мічиган (США) [29].

Ще одним прикладом сучасної реалізації голографічної комунікації стала презентація пристрою Holobox на виставці CES 2024 у Лас-Вегасі. Цей пристрій забезпечує інтерактивне спілкування з повнорозмірною голографічною проекцією людини, створюючи ефект фізичної присутності [29].

Результати вказаних проєктів свідчать про практичну доцільність та інженерну зрілість технологій голографічного зв'язку, а також підкреслюють перспективність їх подальшого впровадження у сфери бізнес-комунікацій, освіти, медицини, оборони й публічних сервісів.

3.2 Дослідження якості сприйняття голографічного конференц-зв'язку

Дослідження голографічного конференц-зв'язку проведено із застосуванням спеціалізованого апаратного та програмного забезпечення для реального передавання тривимірного зображення в реальному часі.

Для формування й передачі тривимірного потоку застосовувались дві сенсорні RGB-D камери Microsoft Kinect, встановлені на обох сторонах телемосту. Камери забезпечували фіксацію глибини сцени, захоплення рухомих об'єктів та передачу зображення у форматі, зручному для подальшого формування голографічного контенту з високим ступенем візуального комфорту для користувача.

Для виведення зображення використовувався проекційний екран, на якому відтворювалося об'ємне голографічне зображення.

У системі було задіяно два сервери обробки відеопотоку та два комутатори D-Link (SW#1, SW#2). Всі компоненти були з'єднані за допомогою UTP-кабелю категорії 5е, який використовувався як середовище передавання даних.

Схема експерименту представлена на рисунку 3.1. Структура стенда для натурного експерименту

Для реалізації натурного експерименту було створено стенд, що імітує голографічний телеміст між двома абонентами з передаванням 3D-відео в реальному часі. Система складається з двох ідентичних вузлів — кожен виконує функції захоплення, обробки, передавання та відображення об'ємного відеопотоку. Передавання даних здійснюється через комутовану мережу з використанням стандарту Ethernet.

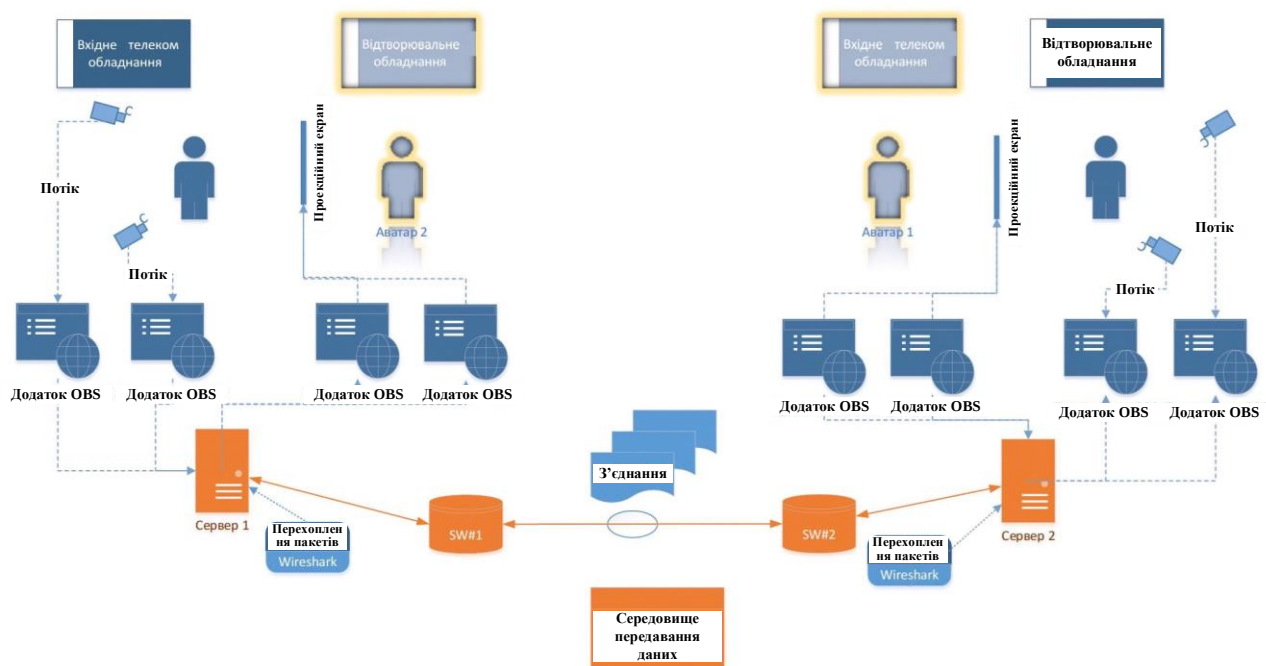


Рисунок 3.1 – Структура системи передавання голографічного конференц-зв'язку

Передача, кодування й трансляція 3D-потоків здійснювалась за допомогою OBS Studio (Open Broadcaster Software) [26] — платформи з відкритим кодом, яка дозволяє формувати потокове відео у реальному часі.

Для моніторингу та аналізу мережевого трафіку використовувалась програма Wireshark [27], яка дозволила зафіксувати зміни в характеристиках навантаження в умовах поступового збільшення кількості передаваних потоків.

На один пристрій було змодельовано 2 потоки 3D-трафіку. Оскільки голографічний телеміст передбачає двосторонній обмін, кількість джерел складала

4 потоки для одного з'єднання. Для моделювання сценаріїв масштабування навантаження поступово збільшували кількість з'єднань — із кроком 4 потоки на кожен додатковий телеміст, створюючи таким чином умови підвищеного навантаження на мережеву інфраструктуру.

Всі з'єднання реалізовувалися на одному й тому ж фізичному обладнанні, що дозволяло точно дослідити зміни в продуктивності без зміни апаратної платформи.

Під час дослідження враховувалися мережеві обмеження, характерні для сучасних комунікаційних інтерфейсів, зокрема максимальна швидкість передачі становила 1 Гбіт/с на завантаження та 1 Гбіт/с на вивантаження, що відповідає пропускній здатності каналів зв'язку стандарту 5G у межах вузького місця.

Згідно з [32], оцінювання якості зображення в межах голографічної конференцсистеми може здійснюватися як об'єктивними, так і суб'єктивними методами. Об'єктивні методи базуються на використанні програмних та апаратних засобів аналізу параметрів відеопотоку (наприклад, затримки, пропускної здатності, втрат пакетів тощо). Суб'єктивні методи реалізовувалися у формі експертного опитування групи користувачів, які оцінювали зображення за шкалами якості сприйняття, ступеня реалістичності, ефекту присутності та емоційного комфорту. Поєднання обох підходів дозволило отримати цілісну картину якості наданої голографічної послуги за умов змінного навантаження.

3.3 Оцінювання результатів дослідження

У ході дослідження здійснювалось суб'єктивне оцінювання якості сприйняття голографічного зображення групою експертів. Для цього було залучено респондентів із досвідом взаємодії з візуальними інформаційними системами. Оцінювання здійснювалось відповідно до попередньо визначених критеріїв якості сприйняття, кожен з яких оцінювався за п'ятибальною шкалою (від 1 — «дуже погано» до 5 — «відмінно»).

Основні критерії суб'єктивної оцінки:

- Ефект глибини — сприйняття просторового об'єму та розташування об'єктів;
- Природність зображення — відповідність зовнішнього вигляду реальним умовам (без спотворень, артефактів);
- Візуальний комфорт — відсутність втоми або подразнення очей, зручність перегляду;
- Цілісність зображення — наскільки зображення є завершеним, без видимих розривів чи фрагментації;
- Плавність руху — відображення анімації без ривків, затримок або втрат кадрів.

Під час кожного сеансу телеприсутності з різною кількістю активних потоків (4, 8, 12 тощо) фіксувались показники якості за кожним із критеріїв. Проведено понад 20 тестових сеансів, кожен тривалістю від 60 до 80 секунд, з поступовим нарощуванням кількості з'єднань. Після завершення кожного сеансу експерти заповнювали оціночні форми. Для кожної демонстрації обчислювалась середня інтегральна оцінка R , яка розраховувалась за формулою:

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N r_i \quad (3.1)$$

де N — кількість експертів;

r_i — оцінка якості i -м експертом.

Отримані середні значення R використовувалися як узагальнений показник QoE (Quality of Experience) для кожної експериментальної конфігурації (тобто певної кількості з'єднань / потоків).

Для дослідження параметрів трафіку, який генерується під час роботи голографічного конференцзв'язку, було використано програмне забезпечення Wireshark — спеціалізований інструмент аналізу мережевих пакетів.

Збір та фіксація статистичних показників проводилися безпосередньо на обох вузлах телемосту під час проведення експериментальних сеансів при різній кількості активних потоків (1, 2, 3 та більше з'єднань).

Основні цілі аналізу: визначення обсягу переданих даних; фіксація пропускної здатності каналів у режимі реального часу; вимірювання затримок, кількості пакетів, середньої швидкості потоку; виявлення потенційних перевантажень або втрат даних. За допомогою інструменту I/O Graphs у Wireshark було побудовано графік динаміки входу/виходу трафіку (input/output rate) для одного з'єднання (4 потоки), який наведено на рисунку 3.2.

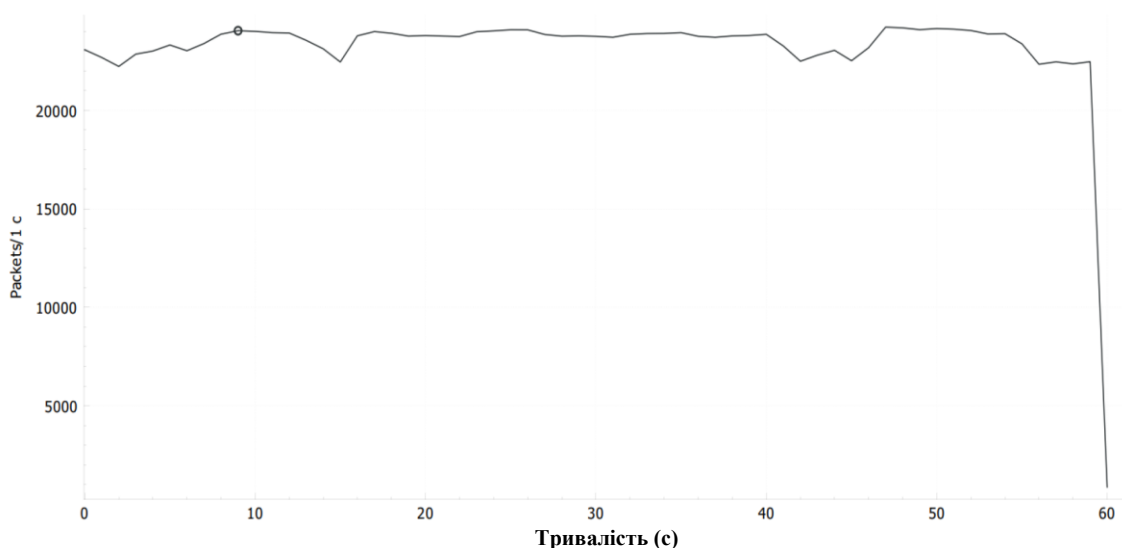


Рисунок 3.2 – Графік вводу/виводу трафіку Wireshark для одного з'єднання

Зі збільшенням кількості з'єднань до п'яти (еквівалентно 20 потокам 3D-відео) було зафіксовано суттєве зростання навантаження на мережеву інфраструктуру.

На рисунку 3.3 представлено графік вводу/виводу трафіку (I/O Graph), побудований у середовищі Wireshark під час натурного експерименту з п'ятьма активними з'єднаннями.

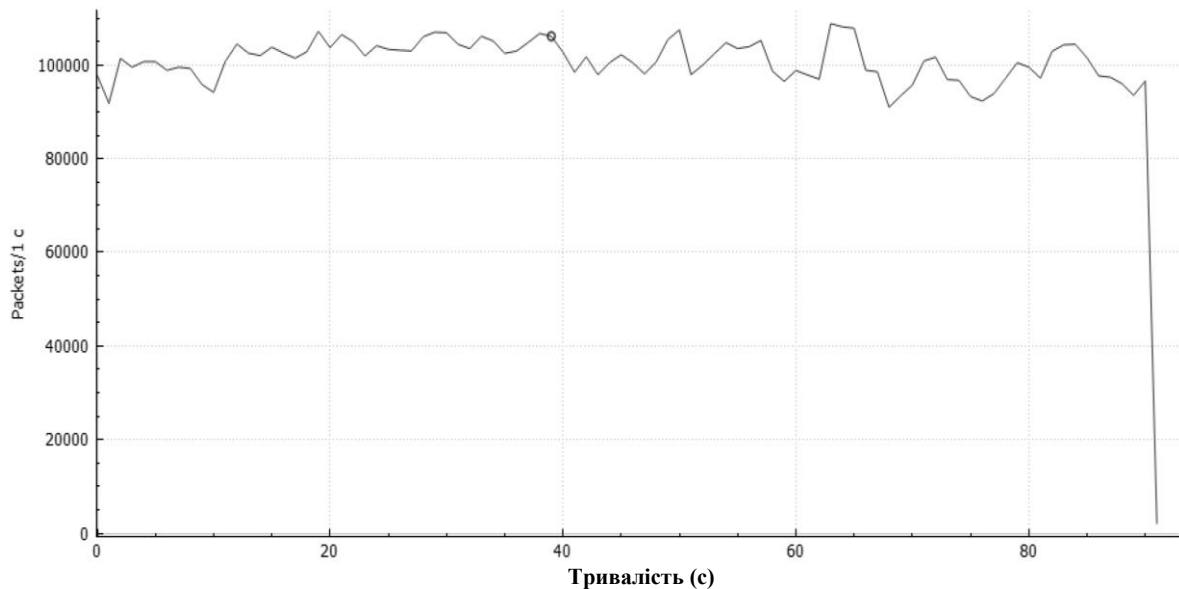


Рисунок 3.3 – Інтенсивність передавання пакетів при п'яти з'єднаннях

У ході дослідження встановлено, що суб'єктивна оцінка якості голографічного зображення, що формується під час сеансів конференцзв'язку, безпосередньо залежить від кількості одночасних з'єднань системи.

Група експертів, залучена до тестування, здійснювала суб'єктивне оцінювання за п'ятибальною шкалою за основними критеріями: глибина сцени, чіткість, плавність руху, зоровий комфорт, реалістичність зображення.

При 8–9 з'єднаннях (до 36 потоків 3D-відео):

- Середня оцінка якості становила 5 балів — візуальний комфорт залишався на високому рівні, затримки були несуттєвими.

Починаючи з 12 з'єднань (48 потоків), спостерігалось різке зниження якості:

- Затримки та втрати пакетів стали візуально помітними,
- Експерти надали усереднену оцінку – 3 бали.

Таким чином, гіпотеза щодо наявності залежності між кількістю активних з'єднань та якістю сприйняття голографічного контенту була експериментально підтверджена. Було встановлено, що гранична кількість з'єднань, за якої зберігається висока оцінка ($\geq 4,5$ бала), становить 9.

Для аналізу поведінки системи при піковому навантаженні було проведено вимірювання характеристик трафіку під час сеансу з 14 одночасними з'єднаннями (56 потоків 3D-відео). Вимірювання проводилися за допомогою Wireshark, дані наведено на рисунку 3.4.

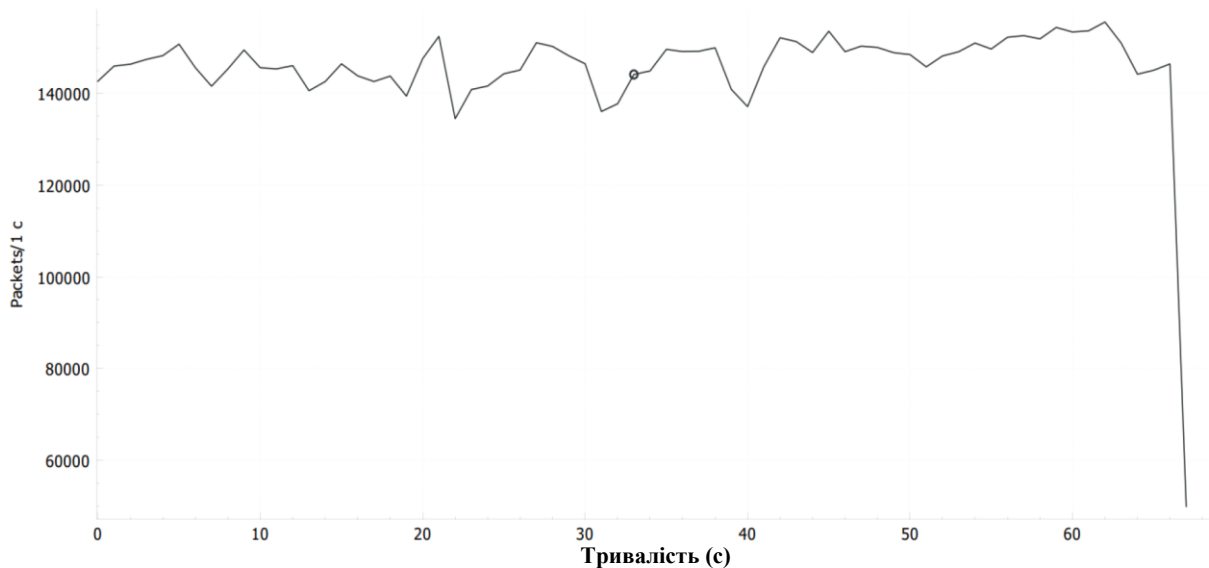


Рисунок 3.4 – Графік мережевого навантаження для 14 з'єднань

Ключові показники: сукупна швидкість передачі сягала 1,2–1,3 Гбіт/с, що перевищує граничну пропускну здатність використаної інфраструктури (1 Gbps Ethernet); втрати пакетів становили 4,1–4,7% у пікових інтервалах; інтенсивність трафіку — до 18 000 пакетів/секунду, з постійними піками понад 20 тис. п/с; час затримки подекуди перевищував 230–270 мс, що створювало помітний ефект "розриву" зображення та асинхронності.

Перевищення допустимої кількості активних з'єднань в умовах обмеженої пропускну здатності мережі призводить до суттєвого погіршення як об'єктивних, так і суб'єктивних характеристик голографічного потоку. Це підтверджує необхідність використання високошвидкісних мережевих рішень або оптимізації алгоритмів кодування для масштабування голографічного конференцзв'язку.

В рамках виконання поставленого завдання дослідження — оцінки впливу навантаження на якість сприйняття голографічного контенту, що передається в режимі реального часу, було визначено граничну кількість одночасних з'єднань, після перевищення якої якість зображення суттєво знижується. З метою забезпечення достовірності результатів було проведено серію досліджень із поступовим збільшенням кількості активних з'єднань (від 1 до 14). На кожному етапі фіксувалися об'єктивні мережеві параметри та проводилась суб'єктивна оцінка якості (QoE) групою експертів за п'ятибальною шкалою. Результати цього етапу експериментального дослідження наведено в таблиці 3.1. Таблиця узагальнює ключові статистичні показники, отримані в процесі поступового збільшення кількості одночасних з'єднань у системі голографічного конференцзв'язку, а також відповідні значення суб'єктивної оцінки якості сприйняття (QoE), визначеної групою експертів.

Таблиця 3.1 – Статистичні результати експерименту з оцінювання впливу кількості з'єднань на якість голографічного зображення

Кількість з'єднань	Кількість потоків	Пакетів/с	Мбіт/с	Оцінювання QoE
1	4	24000	282,624	5
3	12	72000	847,872	5
5	20	110000	1295,36	5
8	32	145000	1472	5
11	44	142000	1648,64	4
12	48	145000	1672,192	3
13	52	125000	1707,52	3
14	56	140000	1707,52	2
15	60	150000	1736,96	1
19	76	147500	1766,4	1

Найвищий бал — 5 — присвоювався у випадках, коли голографічний контент відповідав оригіналу за всіма ключовими параметрами, включаючи глибину сцени, реалістичність зображення, плавність руху, візуальний комфорт та цілісність. Однак, при досягненні кількості з'єднань у межах 10–11 було зафіксовано помітне погіршення візуального сприйняття голографічних аватарів. Суб'єктивна оцінка експертів знизилась до рівня 3,5–3,0 балів, що вказує на зменшення ефективності передачі контенту через перевантаження мережевих ресурсів.

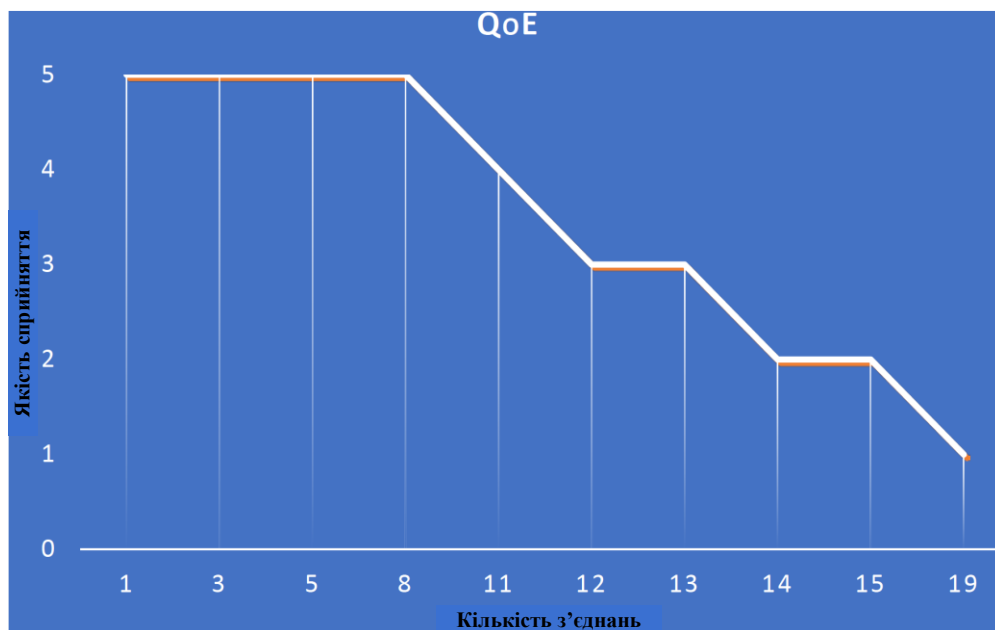


Рисунок 3.5 – Залежність оцінки якості сприйняття голографічного контенту від кількості з'єднань

Експертна група здійснювала оцінювання голографічного контенту за п'ятибальною шкалою. Високий рівень якості сприйняття (5 балів) зберігався при кількості з'єднань до 8–9 включно. Водночас при зростанні кількості з'єднань до 12–13 спостерігалось різке зниження суб'єктивної якості — середня оцінка зменшилася до 3 балів. Експериментально підтверджено гіпотезу щодо наявності залежності між кількістю з'єднань і якістю сприйняття голографічного контенту. В результаті отримано кількісні характеристики граничного

навантаження на систему, за якого зберігається високий рівень задоволеності користувачів.

3.4 Висновки до розділу 3

На основі розробленої схеми було проведено дослідження, у межах якого здійснено оцінювання показників якості сприйняття голографічного контенту за умов поступового зростання навантаження на мережу через збільшення кількості одночасних з'єднань.

Отримані дані створюють підґрунтя для формування вимог до технічних характеристик телекомунікаційних мереж, необхідних для забезпечення високоякісної передачі голографічного контенту. Інтерпретація та узагальнення результатів дослідження дозволили сформулювати такі висновки: зменшення навантаження за рахунок стиснення передаваних даних вимагає дотримання балансу між збереженням цільового рівня якості надання послуги та ефективним розподілом мережевих ресурсів. Для досягнення високого рівня якості голографічного відображення кількість паралельних з'єднань не повинна перевищувати десяти. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування подальших напрямів досліджень і формулювання науково-дослідних задач у сфері розвитку голографічних засобів комунікації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці — це система заходів, спрямованих на забезпечення збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі виконання трудових обов'язків. Вона охоплює такі складові:

Безпека праці, яка передбачає захист працівників від виробничих травм, професійних хвороб та інших шкідливих впливів трудового процесу. Цього досягають шляхом дотримання норм законодавства у сфері охорони праці, використання сучасних засобів захисту тощо;

Гігієна праці, що полягає у створенні безпечного та здорового робочого середовища відповідно до санітарно-гігієнічних норм і стандартів;

Психофізіологічна безпека праці, яка передбачає захист від надмірних фізичних навантажень, рутинної роботи та психоемоційного напруження. Це забезпечується завдяки раціональній організації праці й відпочинку, а також наданню працівникам відповідних засобів індивідуального захисту та гігієни.

Виконання кваліфікаційної роботи на тему «Метод оцінювання інформаційного трафіку в телекомунікаційних мереж п'ятого покоління» здійснювалося в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника відповідно до Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; пряма і відбита блискість; підвищена яскравість; понижена контрастність; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Дотримання ергономічних вимог при організації робочого місця є ключовим фактором у забезпеченні комфорту та безпеки для працівників. Застосування сучасних ергономічних підходів дозволяє зменшити ймовірність професійних захворювань і травм, а також сприяє зростанню продуктивності. Робочі місця, спроектовані з урахуванням фізіологічних та психологічних особливостей персоналу, знижують рівень втоми та стресу, що позитивно впливає на ефективність трудового процесу. Дотримання ергономічних стандартів покращує стан здоров'я працівників, зменшує плинність кадрів і сприяє підвищенню якості виробничої діяльності.

Для створення оптимальних умов праці у сидячому положенні під час виконання роботи робоче місце працівника повинно відповідати вимогам, визначеним у ДСТУ 8604:2015. При виборі меблів для робочого місця з ПК варто з'ясувати її відповідність вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98. Велика кількість наявних у даний час комп'ютерних столів не відповідають вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 за висотою робочої поверхні над підлогою. Практично всі комп'ютерні столи мають підставку, що висувається, для розташування клавіатури, виконання якої не відповідає вимогам Директиви № 90/270/ЄЕС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями (п'ята окрема директива в рамках тлумачення Статті 16(1) Директиви 89/391/ЄЕС)». Вимога цієї статті Директиви – забезпечення достатнього простору перед клавіатурою, наявність опори для рук оператора. У конструкції спеціального комп'ютерного столу з підставкою, що висувається, така вимога не забезпечується.

Робоче місце має бути обладнане спеціальною підставкою для документів та для ніг. Екран дисплея, клавіатуру та документи необхідно розміщувати на раціональній відстані (приблизно 50 см) від очей оператора, а верхній край дисплея повинен розташовуватися на рівні очей користувача. Робоче крісло має

бути належним чином адаптоване до форми тіла і підтримувати правильну поставу. Важливо, щоб усі елементи робочого місця були регульованими, включаючи висоту столу та кут нахилу клавіатури, щоб працівник міг налаштувати своє обладнання на зручний робочий режим.

Приміщення, в якому знаходиться робоче місце має загальну площу 18,65 м², і висотою стелі 3,2 м. У приміщенні знаходиться 3 робочих місця обладнаних ПК. Слід відзначити, що площа одного робочого місця працівника, який використовує під час роботи ПК не повинна бути меншою за 6 м², а об'єм не менший за 20м³, відповідно до НПАОП 0.00-7.15-18. У досліджуваному приміщенні на одного працівника припадає 6,2 м², що відповідає допустимій нормі. Об'єм даного приміщення становить 59,7 м³, відповідно на одного працівника припадає 19,9 м³, що знаходиться на межі допустимої норми.

Для підтримання високого рівня працездатності та запобігання професійним захворюванням необхідно дотримуватися оптимального режиму праці та відпочинку. Зокрема, рекомендовано робити п'ятихвилинні перерви після кожної години роботи (на додаток до основної обідньої перерви). Під час цих коротких пауз доцільно виконувати вправи, спрямовані на зниження втоми очей та підтримання м'язового тону. Крім того, для зменшення нервово-психологічного напруження доцільно облаштувати приміщення для психофізіологічного розвантаження.

4.1.2 Електробезпека приміщення

Приміщення, де виконувалася робота для забезпечення електробезпеки обладнання, а також для захисту від ураження електричним струмом самих користувачів ПК повинні мати достатні технічні засоби захисту відповідно до НПАОП 40.1-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів», НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». З метою запобігання ушкодженням, що можуть статися через ураження електричним струмом, загоряння, коротке замикання тощо,

розроблено загальний стандарт безпеки ІЕС 950. Загальним стандартом електробезпечності для країн Європейської співдружності є Cemark.

На робочих місцях знаходиться 3 комп'ютери. Напруга джерела живлення комп'ютерів – 220 В. За небезпекою ураження електричним струмом таке приміщення належить до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом працюючих.

Електротравми, які можуть виникнути на робочому місці, можуть мати різні причини, і основні серед них такі:

Несправність електричного обладнання. Використання застарілого або несправного електричного обладнання може призвести до коротких замикань, перенапруги та інших електричних проблем, які в результаті можуть призвести до електротравми.

Недотримання правил електробезпеки. Наприклад, слід заземлення, неправильне використання подовжувачів, розеток або електричних шнурів може призвести до травми.

Незнання ризиків. Працівники можуть не бути повністю обізнаними з деякими ризиками, пов'язаними з електротехнікою, і не дотримуватися певних заходів безпеки.

Статичний заряд. Накопичений статичний заряд на одязі або обладнанні може призвести до несправностей в електроніці або навіть до іскри, що може стати причиною пожежі.

Недоліки організації виробничого середовища зокрема, не раціонально обладнане робоче місце, недостатнє освітлення, некомфортні умови та нестабільне електропостачання можуть сприяти виникненню електротравм.

Для запобігання електротравмам у приміщенні здійснюються:

- 1) ізоляція нормально струмоведучих елементів електроустаткування відповідно з вимогами нормативів;
- 2) захисне заземлення із використанням природних заземлювачів;
- 3) систематичне проведення інструктажу з електробезпеки;
- 4) суворе дотримання правил електробезпеки на робочому місці.

Для попередження електротравм на робочому місці розробника важливо дотримуватися всіх необхідних правил електробезпеки, регулярно перевіряти стан обладнання та освітлення, а також стан робочого місця, і вживати необхідні заходи безпеки при виконанні роботи з електроприладами.

Для запобігання електротравм на робочому місці розробника необхідно враховувати всі основні правила електробезпеки та приділяти увагу ряду важливих аспектів, зокрема здійснювати регулярну перевірку стану обладнання та освітлення, а також стану робочого місця.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Фізіологічні процеси та загальне самопочуття людини залежать від постійного відведення тепла, яке виробляється в організмі, у навколишнє середовище. Досягнення оптимальних мікрокліматичних умов є фактором для регулювання цього процесу. У разі недостатньо комфортних мікрокліматичних умов організм людини використовує різні механізми для підтримки сталої температури тіла, шляхом контролю тепловироблення та тепловіддачі. За витратами енергії ввиконання роботи, відповідно до Гігієнічної класифікації праці, ця діяльність відноситься до категорії I б. Нормовані параметри мікроклімату для цієї категорії працівників наведені в таблиці 4.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99).

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для забезпечення комфортних умов перебування людей у приміщенні передбачено:

- опалення приміщення здійснюється за допомогою централізованої парової системи опалення, що забезпечує комфортну температуру в приміщенні в холодну пору року;
- повітрообмін забезпечується за допомогою системи припливно-витяжної вентиляції;
- систематичне вологе прибирання для підтримання оптимального рівня вологості повітря в приміщенні.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Для створення нормальних умов виробничої діяльності необхідно забезпечити не лише комфортні метеорологічні умови, а й необхідну чистоту повітря. Внаслідок виробничої діяльності у повітряне середовище приміщень можуть надходити різноманітні шкідливі речовини, що використовуються в технологічних процесах. Основними джерелами забруднення повітря в робочій зоні є комп'ютерні пристрої, системи автоматики та оператори, які працюють з обладнанням. Для визначених шкідливих речовин існують конкретні ГДК, які відображені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньодобова	
Озон	0,16	0,03	1
Вуглекислий газ (CO ₂)	3	1	4
Формальдегід	0,35	0,03	2
Пил нетоксичний	10	4	4

Повітря, що містить негативні аероіони, є своєрідним екраном, що відображає випромінювання позитивних іонів від дисплеїв, телевізорів та іншої оргтехніки. Нормативні рівні іонізації повітря у виробничих та громадських приміщеннях наведені в санітарних правилах і нормативах СанПіН 2.2.4.1294-

03. Згідно з цим документом регламентують: мінімально допустимий рівень, максимально допустимий рівень, коефіцієнт уніполярності (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення належного складу повітря в робочій зоні використовується механічна вентиляція та систематичне вологе прибирання.

4.2.3 Виробниче освітлення

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно з статистичними даними, до 5% травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20% воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатії.

Для створення оптимальних умов зорової роботи слід враховувати не лише кількість та якість освітлення, а й кольорове оточення. Так, при світлому пофарбуванні інтер'єру завдяки збільшенню кількості відбитого світла рівень освітленості підвищується на 20-40% (при тій же потужності джерел світла), різкість тіней зменшується, покращується рівномірність освітлення.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 зазначені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО,			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення достатнього освітлення в приміщенні використовується комплекс заходів, що включають: регулярне чищення вікон і ламп (з метою запобігання помутнінню скла та втраті працездатності ламп), вибір оптимального типу освітлювальних приладів та їх раціональне розміщення.

4.2.4 Виробничий шум

Шум – це сукупність звуків різноманітної частоти та інтенсивності, що виникають у результаті коливального руху частинок у пружних середовищах (твердих, рідких, газоподібних). Шумом також вважають будь-який небажаний для людини звук. У працюючих в умовах шуму основними скаргами є: зниження слуху, головний біль тупого характеру, відчуття важкості і шуму в голові, що виникають до кінця робочої зміни або після роботи, запаморочення при зміні положення тіла, підвищена дратівливість, швидка стомлюваність, зниження працездатності, уваги, підвищена пітливість, порушення ритму сну (сонливість вдень, тривожний сон у нічний час). Можуть спостерігатися неприємні відчуття в області серця у вигляді поколювань, серцебиття. Відзначається виражена

нестійкість пульсу і артеріального тиску, особливо в період перебування в умовах шуму.

Джерелами шуму під час виконання роботи є працююча техніка та транспорт, який рухається ззовні приміщення. Допустимі рівні звукового тиску та рівні звуку L_A в приміщенні наведені у таблиці 4.5. (згідно ДСН 3.3.6.037-99).

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні звукового тиску і рівні звуку для постійного шуму

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні передбачено використання звукопоглинаючих матеріалів та раціональне розташування виробничого обладнання.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Під час виконання роботи використовувалися комп'ютери та відповідне програмне забезпечення. Це може сприяти підвищенню рівня електромагнітного випромінювання на робочому місці. Ступінь впливу цього випромінювання на організм працівника залежить від багатьох факторів, таких як діапазон частот, тривалість опромінення, характер опромінення, режим опромінення, розміри поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальні особливості організму. Електромагнітні випромінювання, випромінювані відеодисплеями, мають широкий діапазон частот. Відповідно до стандартів, електромагнітне випромінювання повинне бути виміряне в діапазоні частот від 5 Гц до 400 кГц. Гранично допустимі значення напруженості електричного і магнітного полів промислової частоти в залежності від часу їх впливу встановлюються ДСанПіН

З.3.6.096-2002. Згідно з цим нормативним документом перебування в ЕП промислової частоти напруженістю до 5 кВ/м допускається протягом усього робочого дня. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля радіочастотного діапазону для працівника становлять $E_{гдр} = 25$ В/м та $B_{гдр} = 250$ нТл.

Для зменшення впливу електромагнітного випромінювання на проектувальника слід дотримуватися раціонального режиму роботи та відпочинку.

4.3 Пожежна безпека

Оцінка пожежонебезпечних властивостей речовин і матеріалів передбачає визначення комплексу показників, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу) та умов їхнього використання. Номенклатура показників та їхнє визначення й застосування для характеристики вибухопожежонебезпеки речовин і матеріалів приймається за ДБН В.1.1.7-2016.

Відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 приміщення, де проводиться робота відноситься до категорії пожежної небезпеки В, яка характеризується наявністю паперу в сухому стані, що використовується під час роботи. Це приміщення відноситься до II-го ступеня вогнестійкості, в якому приміщення знаходяться в будівлі з несучими і відгороджуючими конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плиткових негорючих матеріалів. В покриттях будівель допускається застосовувати незахищені сталеві конструкції.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Система запобігання пожежі передбачає: періодичний контроль цілісності ізоляції; наявність спеціальних місць для куріння; періодичне проведення інструктажів з протипожежної безпеки; незахаращення приміщення горючими матеріалами; наявність системи захисту від атмосферної електрики.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Приміщення оснащене вуглекислотними вогнегасниками – на території 300 м² 4 вогнегасника (в кожному відділі і на сходовому марші). Також у коридорі встановлений пожежний гідрант з рукавом, який підключений до системи водопостачання.

Вогнегасники слід встановлювати у легкодоступних та помітних місцях (коридорах, біля входів або виходів з приміщень тощо), а також у пожежонебезпечних місцях, де найбільш вірогідна поява осередків пожежі. При цьому необхідно забезпечити їх захист від попадання прямих сонячних променів і безпосередньої (без загороджувальних щитків) дії опалювальних та нагрівальних приладів.

Використані вогнегасники, а також вогнегасники із зірваними пломбами необхідно негайно направляти на перезарядження або перевірку. Вогнегасники, відправлені з об'єкта на перезарядження, повинні бути замінені відповідною кількістю заряджених вогнегасників.

Власники підприємств, установ та організацій або уповноважені ними органи, а також орендарі зобов'язані:

- розробляти комплексні заходи щодо забезпечення пожежної безпеки, впроваджувати передові досягнення науки;
- забезпечувати дотримання протипожежних вимог стандартів, норм, правил, а також виконання вимог приписів і постанов органів державного пожежного нагляду;
- організовувати навчання працівників правилам пожежної безпеки та пропаганду заходів щодо їх забезпечення;
- у разі відсутності нормативних актів вимог, необхідних для забезпечення пожежної безпеки, вживати відповідні заходи, погоджуючи їх з органами державного нагляду;
- утримувати в справному стані засоби протипожежного захисту і зв'язку, пожежну техніку, обладнання та інвентар, не допускати їх використання не за призначенням;

- створювати, у разі потреби, відповідно до встановленого порядку, підрозділи пожежної охорони та необхідну для їх функціонування матеріально-технічну базу;
- подавати на вимогу державної пожежної охорони відомості та документи про стан пожежної безпеки об'єктів і продукції, що ними виробляється;
- здійснювати заходи щодо впровадження автоматичних засобів виявлення та гасіння пожеж і використання з цією метою виробничої автоматики;
- своєчасно інформувати пожежну охорону про несправність пожежної техніки, систем протипожежного захисту, водопостачання, а також про закриття доріг і проїздів на своїй території;
- проводити службове розслідування випадків пожеж.

ВИСНОВКИ

У межах виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи було здійснено комплексне дослідження особливостей інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління з урахуванням перспективного розвитку голографічних послуг. На основі аналізу проведених досліджень, моделювань та аналітичних оцінок сформульовано такі висновки:

1. Голографічні сервіси, як один із ключових драйверів зростання трафіку у мережах нового покоління, потребують значно більших ресурсів порівняно з традиційними мультимедійними сервісами. Очікуване багаторазове зростання трафіку вимагає переосмислення підходів до його оцінювання та обробки.

2. Визначено характерні риси голографічного типу комунікації та введено авторські трактування базових понять, що створює концептуальну основу для подальших досліджень у цій галузі.

3. Дослідження інноваційних технологій стискання та передачі голографічного контенту дозволило визначити напрями оптимізації процесу надання послуг із забезпеченням високої якості відтворення.

4. Розроблені трафікові моделі для мультимедійних, голографічних і IoT-сервісів показали, що дані сервіси генерують трафік із гетерогенними розподілами. Виявлено властивість самоподібності трафіку голографічних сервісів, що є критично важливим для планування ресурсів мережі.

5. Проведено класифікацію кінцевого обладнання для голографічного контенту та сформульовано вимоги до архітектури мереж 5G і вище, що дозволяє адаптувати інфраструктуру до потреб нових типів послуг.

6. На основі побудованої модельної мережі й отриманих експериментальних даних створено аналітичну модель трафіку голографічних потоків, яка може бути використана як інструмент для прогнозування навантаження на мережу.

7. Суб'єктивне оцінювання якості сприйняття голографічного зображення засвідчило існування критичної межі кількості потоків, за якої істотно

знижується рівень користувацького задоволення. Це необхідно враховувати при плануванні сервісів та розподілі мережевих ресурсів.

8. Практична цінність результатів дослідження полягає не лише в науковій новизні, але й у можливості їх використання в освітньому процесі для підготовки фахівців у сфері телекомунікацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Akyildiz, I. F. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade / I. F. Akyildiz, H. Guo //ITU Journal on Future and Evolving Technologies. – 2022. – Т. 3. – №. 2. – С. 421-442.
2. Giuliano, R. From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances and Enabling Technologies / R. Giuliano //IEEE Access. – 2024.
3. Giogiou, N. A qualitative study on the ethical and/or legal challenges based on the stakeholders' perspectives / N. Giogiou // Holographic Communications Technologies – 2022.
4. Anmulwar S. Frame Synchronisation for Multi-Source Holographic Teleportation Applications. – 2023.
5. Al Jamal A. The impact of the holographic principle build the whole into the parts on organizational performance //Management Studies and Economic Systems. – 2020. – Т. 5. – №. 3/4. – С. 127-136.
6. Nardo, F.; Peressoni, D.; Testolina, P.; Giordani, M.; Zanella, A. Point cloud compression for efficient data broadcasting: A performance comparison. In Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Austin, TX, USA, 10–13 April 2022; pp. 2732–2737.
7. J. van der Hooft, M. T. Vega, C. Timmerer, A. C. Begen, F. De Turck, and R. Schatz, “Objective and subjective qoe evaluation for adaptive point cloud streaming,” in 2020 Twelfth International Conference on Quality of Multimedia Experience (QoMEX), pp. 1–6, 2020.
8. Tölgyessy, M.; Dekan, M.; Chovanec, L.; Hubinsk`y, P. Evaluation of the azure Kinect and its comparison to Kinect V1 and KinectV2. Sensors 2021, 21, 413. [CrossRef]
9. ITU-T Technical Report, “Representative use cases and key network requirements for network 2030,” January 2020. [online] Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/opb/fg/T-FG-NET2030-2020-SUB.G1-PDF-E.pdf.

10. H. Liu, P. Yang, X. Wang, and W. Liu, “A qoe-fair synchronized transmission scheme for edge-assisted interactive virtual reality,” in IEEE INFOCOM 2023 -IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WK-SHPS), pp. 1–6, 2023
11. Quach, M.; Pang, J.; Tian, D.; Valenzise, G.; Dufaux, F. Survey on deep learning-based point cloud compression. *Front. Signal Process.* 2022, 2, 846972. [CrossRef]
12. Chen, M.; Zhang, P.; Chen, Z.; Zhang, Y.; Wang, X.; Kwong, S. End-to-end depth map compression framework via rgb-to-depth structure priors learning. In *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, Bordeaux, France, 16–19 October 2022; pp. 3206–3210.
13. Boopathiraja, S.; Punitha, V.; Kalavathi, P.; Prasath, V.S. Computational 2D and 3D medical image data compression models. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2022, 29, 975–1007. [CrossRef] [PubMed]
14. E. Sahin, E. Stoykova, J. Mäkinen, A. Gotchev, Computer-generated holograms for 3D imaging: a survey, *ACM Computing Surveys (CSUR)*53 (2) (2020) 1–35.
15. Shen, J.; Cashman, T.J.; Ye, Q.; Hutton, T.; Sharp, T.; Bogo, F.; Fitzgibbon, A.; Shotton, J. The phong surface: Efficient 3D model fitting using lifted optimization. In *Proceedings of the Computer Vision–ECCV 2020: 16th European Conference*, Glasgow, UK, 23–28 August 2020; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; Volume 16, pp. 687–703.
16. Ishigaki, S.A.K.; Ismail, A.W. Real-time 3D reconstruction for mixed reality telepresence using multiple depth sensors. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Communication and Intelligent Systems, Virtual*, 20– 21 October 2022; pp. 67–80.
17. Anmulwar, S.; Wang, N.; Pack, A.; Huynh, V.S.H.; Yang, J.; Tafazolli, R. Frame Synchronisation for Multi-Source Holographic Teleportation Applications- An Edge Computing Based Approach. In *Proceedings of the 2021 IEEE 32nd Annual*

International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Helsinki, Finland, 13–16 September 2021; pp. 1–6.

18. Selinis, I.; Wang, N.; Da, B.; Yu, D.; Tafazolli, R. On the Internet-scale streaming of holographic-type content with assured user quality of experiences. In Proceedings of the 2020 IFIP Networking Conference (Networking), Paris, France, 22–25 June 2020; pp. 136–144.

19. X. Zhang, Y. Hu, and T. Huang, “A multiplayer mr application based on adaptive synchronization algorithm,” in 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), vol. 1, pp. 628–632, 2020.

20. Akyildiz, I.F.; Guo, H. Holographic-type communication: A new challenge for the next decade. *ITU J. Future Evol. Technol.* 2022, 3, 421–442.

21. I. Selinis, N. Wang, B. Da, D. Yu, and R. Tafazolli, “On the internet-scale streaming of holographic-type content with assured user quality of experiences,” in 2020 IFIP Networking Conference (Networking), pp. 136–144, 2020.

22. A. E. Essaili, S. Thorson, J. Alvin, J. C. Ewert, N. Tyudina, H. Caltenco, L. Litwic, and B. Burman, “Holographic communication in 5g networks,” 2022. [online] Available: <https://www.ericsson.com/49a8b1/assets/local/reports-papers/ericsson-technology-review/docs/2022/holographic-communication-in-5g-networks.pdf>.

23. A. Clemm, M. T. Vega, H. K. Ravuri, T. Wauters, and F. D. Turck, “Toward truly immersive holographic-type communication: Challenges and solutions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 93–99, 2020.

24. Murroni, M.; Anedda, M.; Fadda, M.; Ruiiu, P.; Popescu, V.; Zaharia, C.; Giusto, D. 6G—Enabling the New Smart City: A Survey. *Sensors* 2023, 23, 7528.

25. Park, S.; Bokijonov, S.; Choi, Y. Review of microsoft hololens applications over the past five years. *Appl. Sci.* 2021, 11, 7259.

26. Yulong Liu, Shan Wu, Qi Xu, Hubin Liu, "Holographic Projection Technology in the Field of Digital Media Art", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, Article ID 9997037, 12 pages, 2021.

27. Cernigliaro G. et al. Extended Reality Multipoint Control Unit—XR-MCU Enabling Multi-user Holo-conferencing via Distributed Processing //International Broadcasting Convention IBC. – 2020. – С. 1-9.
28. Li N., Lefevre D. Holographic teaching presence: participant experiences of interactive synchronous seminars delivered via holographic videoconferencing //Research in learning technology. – 2020. – Т. 28.
29. Themelis C., Sime J. A. From video-conferencing to holoportation and haptics: How emerging technologies can enhance presence in online education? //Emerging technologies and pedagogies in the curriculum. – 2020. – С. 261-276.
30. Montagud M. et al. Social VR and multi-party holographic communications: Opportunities, Challenges and Impact in the Education and Training Sectors //arXiv preprint arXiv:2210.00330. – 2022.
31. Hjej, Mohamad, Mario Montagud and David Rincón. “Multiuser Virtual Experiences powered by Holoportation Technologies and Multimodal Human-Computer Interaction (HCI).” Proceedings of the 15th ACM Multimedia Systems Conference (2024): n. pag
32. Fernández S. et al. Addressing Scalability for Real-time Multiuser Holoportation: Introducing and Assessing a Multipoint Control Unit (MCU) for Volumetric Video //Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia. – 2023. – С. 9243-9251.
33. Siemonsma S., Bell T. Holokinect: Holographic 3D video conferencing //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 21. – С. 8118.
34. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php
35. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028
36. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та

небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html

37. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

38. СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

39. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

40. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

41. ДСанПіН 3.3.6.096-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03>

42. ДСанПіН 3.3.2-007-98 Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0007282-98#Text>

43. Директива № 90/270/ЄС «Про мінімум вимог безпеки і гігієни праці при роботі з екранними пристроями (п'ята окрема директива в рамках тлумачення Статті 16(1) Директиви 89/391/ЄС)».

44. НПАОП 40.1-1.07-01 «Правила експлуатації електрозахисних засобів» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21830
45. НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://antifire.ua/dbn/10.pdf>
46. НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=47257
47. НАПБ А.01.001-14 Правила пожежної безпеки в Україні [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon.nau.ua/doc/?code=z1410-04>
48. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759
49. ДБН В.1.1.7-2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002..pdf

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ТРАФІКУ В
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

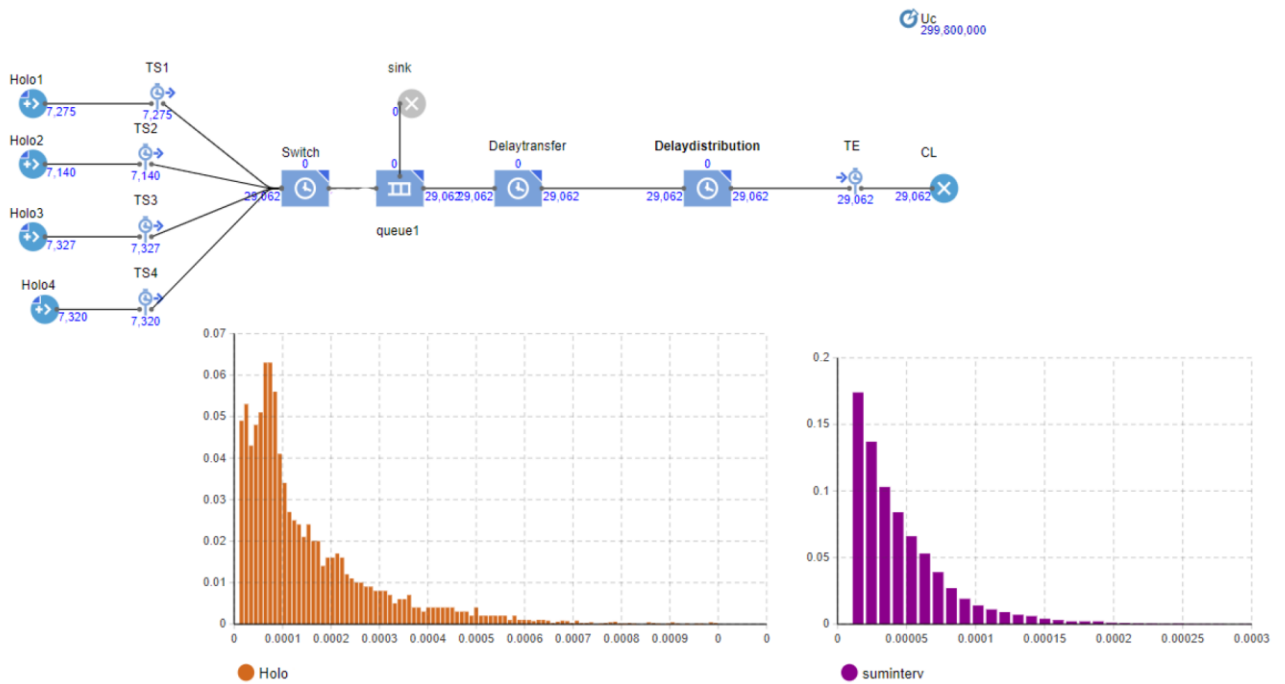


Рисунок 1 – Функціональна модель системи в середовищі моделювання AnyLogic

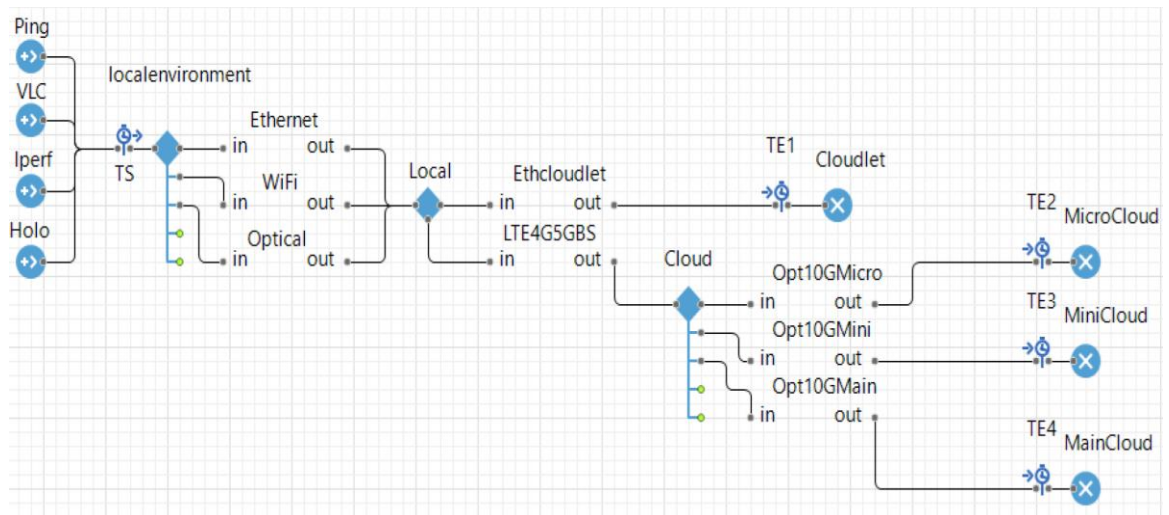


Рисунок 2 – Структура імітаційної моделі в середовищі AnyLogic

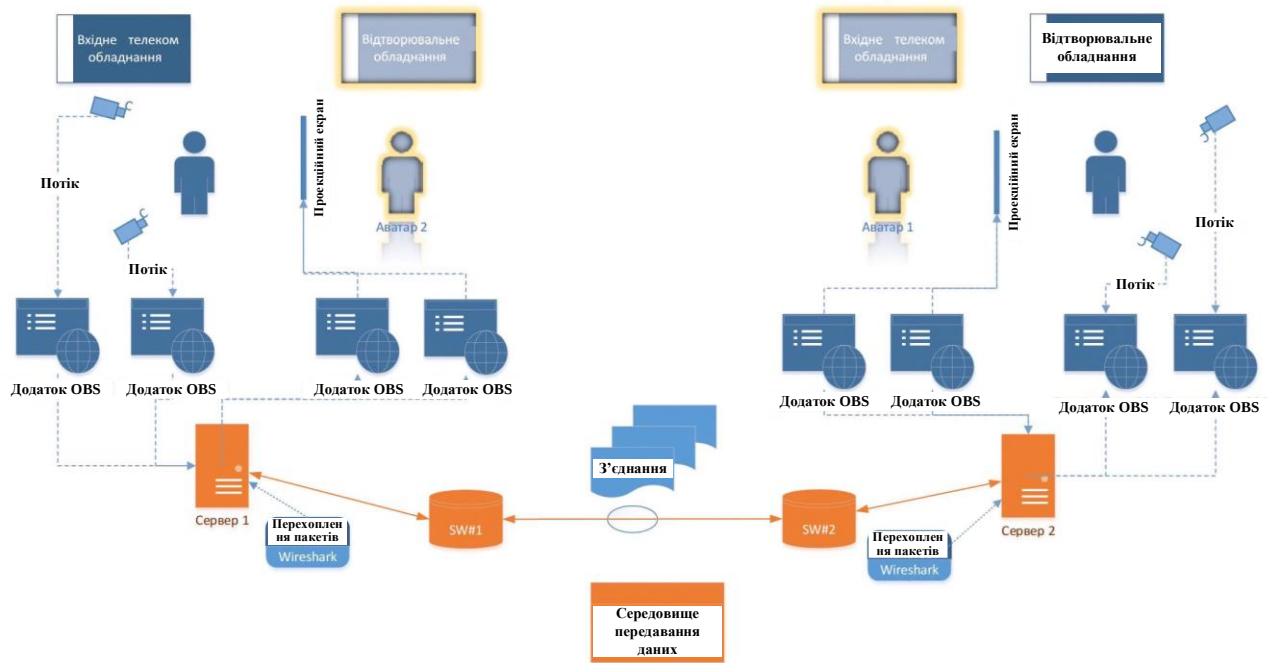


Рисунок 3 – Структура системи передавання голографічного конференц-зв'язку

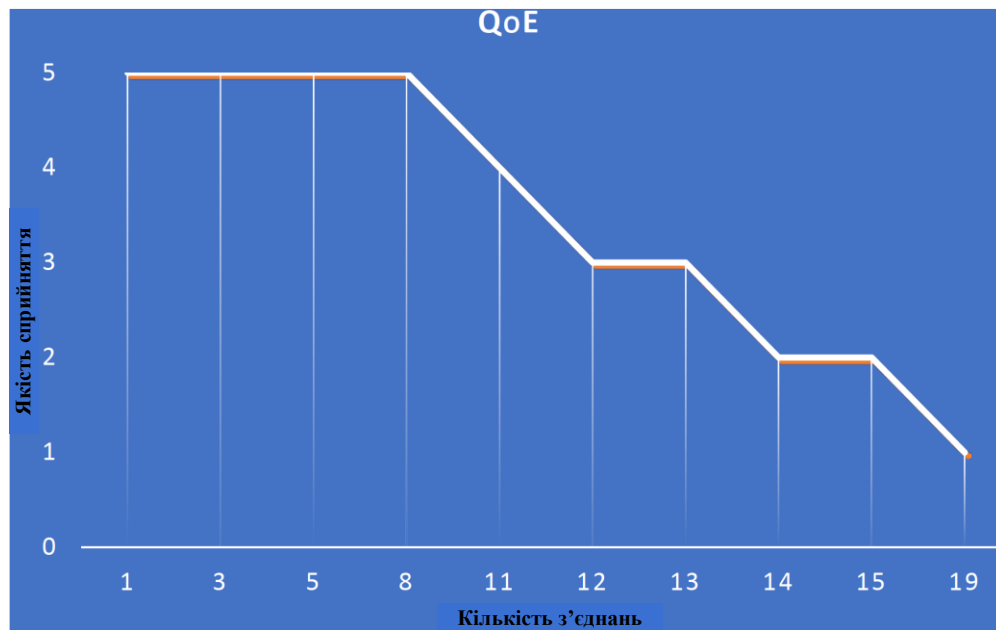


Рисунок 4 – Залежність оцінки якості сприйняття голографічного контенту від кількості з'єднань

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Метод оцінювання інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах п'ятого покоління

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-23мсз
(кафедра, факультет, нпичальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 0,63 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.
(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Кравченко М.Р.
(прізвище, ініціали)