ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «VR ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СФЕРИ ВІДДАЛЕНОЇ СПІВПРАЦІ КОМАНД»

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
зі спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія»
(назва)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ *Ольга КЛЕЦЬ*
(підпис) *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ здобувача*

Виконав: здобувач(ка) вищої освіти гр. КІД-42
Ольга КЛЕЦЬ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Олександр ЗУБ
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Рецензент:
науковий ступінь, вчене звання Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Навчально-науковий інститут Інформаційних технологій

Кафедра Комп'ютерної інженерії

Ступінь вищої освіти бакалавр

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Комп'ютерної інженерії
_____ Наталія ЛАЩЕВСЬКА
«_____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Клець Ольга Віталіївна
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «VR технології для сфери віддаленої співпраці команд»
керівник кваліфікаційної роботи: Олександр ЗУБ, асистент кафедри КІ,
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «24» лютого 2025р. №56
2. Строк подання кваліфікаційної роботи«05» червня 2025р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література, технології та платформи VR, інструменти для віддаленої співпраці, апаратне та програмне забезпечення VR, методи оцінки ефективності VR у командній роботі, аналіз практичних кейсів та тенденцій розвитку VR.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
    1. Теоретичні основи VR у віддаленій співпраці
    2. Технологічні та організаційні аспекти використання VR
    3. Перспективи та рекомендації щодо впровадження VR
5. Перелік ілюстративного матеріалу: *презентація*
    1. Мета, об'єкт, предмет дослідження
    2. Актуальність роботи
    3. Потреба застосування VR у віддаленій командній роботі
    4. Класифікація VR-рішень та аналіз можливостей співпраці у VR
    5. Архітектура реалізації мобільної VR системи
    6. Демонстрація роботи мобільної VR системи
    7. Технічне налаштування та інтерфейс Trinus VR
    8. Застосування VR у процесі дистанційної роботи
    9. Проблеми та обмеження Trinus VR
    10. Метод покращення якості передачі зображення

11. Метод зменшення затримки сигналу між клієнтом та сервером Trinus VR
12. Кошторис реалізації та економічна доцільність
13. Висновки
14. Публікації та апробація роботи

6. Дата видачі завдання «24» лютого 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір даних	25.02-19.03.2025	
2	Обробка матеріалу	20.03-02.04.2025	
3	Розробка теоретичної частини	03.04-07.04.2025	
5	Технічні та інженерні підходи до реалізації VR-середовища	08.04-27.04.2025	
6	Аналітична оцінка, оптимізація та перспективи застосування	28.04-11.05.2025	
7	Висновки за результатами аналізу	12.05-15.05.2025	
8	Розробка презентації	16.05-26.05.2025	
9	Передзахист	27.05-29.05.2025	
10	Здача в деканат	30.05-05.06.2025	

Здобувач(ка) вищої освіти _____ Ольга КЛЕЦЬ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Олександр ЗУБ
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня бакалавра: 90 стор., 43 рис., 8 табл., 32 джерел.

Мета роботи – спрощення впровадження віртуальної реальності у віддалену співпрацю малих команд за рахунок використання бюджетних VR-рішень і моделей взаємодії на основі стандартних мобільних пристроїв.

Об'єкт дослідження – процес організації віддаленої колективної взаємодії у віртуальному середовищі.

Предмет дослідження – апаратні та програмні VR-засоби для реалізації спільної присутності у віртуальному просторі на основі бюджетної інфраструктури.

Короткий зміст роботи: У роботі розглянуто доступні засоби створення VR-середовищ для віддаленої співпраці з фокусом на використання смартфонів і безкоштовного програмного забезпечення Trinus VR як альтернативи дорогим VR-системам. Наведено порівняльний аналіз популярних VR-рішень за технічними характеристиками, вартістю, зручністю використання та придатністю до офісної взаємодії.

Запропоновано методичні рекомендації для компаній, які бажають впровадити VR без значних витрат, та розроблено поетапну інструкцію з налаштування тестового середовища. Проведено оцінку економічної доцільності мобільного підходу, визначено обмеження та варіанти ефективного застосування VR у навчанні, демонстраціях і на початкових етапах цифрової трансформації командної співпраці.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ВІРТУАЛЬНА РЕАЛЬНІСТЬ, ВІДДАЛЕНА СПІВПРАЦЯ, TRINUS VR, БЮДЖЕТНЕ VR, МОБІЛЬНА ГАРНІТУРА, СПІЛЬНА ПРИСУТНІСТЬ, КОЛАБОРАЦІЯ, VR-ПЛАТФОРМИ, ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ.

ABSTRACT

Text part of the qualification work for obtaining a bachelor's degree: 90 pages, 43 figures, 8 tables, 32 sources.

The purpose of the work is to simplify the implementation of virtual reality in remote team collaboration through the use of low-cost VR solutions and interaction models based on standard mobile devices.

The object of the study is the process of organizing remote collaborative interaction in a virtual environment.

The subject of the study is hardware and software VR tools for enabling shared presence using budget infrastructure.

Summary of the work: The paper explores affordable VR collaboration tools with a focus on using smartphones and Trinus VR software as an alternative to expensive commercial VR headsets. A comparative analysis of common VR platforms is provided, including Meta Quest, HTC Vive, Pico, and Trinus VR, considering technical specifications, cost-efficiency, usability, and applicability to remote teamwork.

Methodical recommendations are proposed for companies seeking to explore VR without major investments. A step-by-step setup guide is provided, along with an assessment of the economic feasibility of mobile VR for educational, prototyping, and demonstration purposes. Despite technical limitations, Trinus VR offers sufficient functionality for initial experiments and can serve as a gateway to more advanced VR applications.

KEYWORDS: VIRTUAL REALITY, REMOTE COLLABORATION, TRINUS VR, BUDGET VR, MOBILE HEADSET, SHARED PRESENCE, TEAMWORK, VR PLATFORMS, COST-EFFECTIVENESS.

ЗМІСТ

ВСТУП..... 9
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ VR-ТЕХНОЛОГІЙ У ВІДДАЛЕНІЙ СПІВПРАЦІ 10
1.1 Історичний розвиток концепції віддаленої взаємодії..... 10
1.2 Принципи та класифікація технології віртуальної реальності..... 15
1.3 Потенціал VR як засобу забезпечення колективної взаємодії 23
1.4 Соціально-психологічні аспекти використання VR у командній роботі 27
1.5 Аналіз сучасних технологічних рішень для організації VR-співпраці 31
РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ ТА ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ VR-СЕРЕДОВИЩА 38
2.1 Архітектура інтегрованої системи віртуальної взаємодії..... 38
2.2 Технічні характеристики та вимоги до пристроїв і програмних засобів 46
2.3 Функціональні сценарії застосування VR у процесі дистанційної роботи..... 55
2.4 Алгоритмічне забезпечення налаштування та запуску системи VR-візуалізації……..62
РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ…….71
3.1 Шляхи підвищення ефективності використання віртуального середовища..... 71
3.2 Порівняльний аналіз бюджетних і комерційних рішень для VR-співпраці 81
3.3 Методичні рекомендації щодо впровадження VR-технологій у робочі процеси……...91
ВИСНОВКИ..... 98
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……...…….…..99
Додаток А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ (Презентація)…….....102

ВСТУП

Останні роки ознаменувалися стрімким зростанням популярності віддаленого формату роботи, що сформувало нові вимоги до інструментів командної взаємодії. Традиційні засоби комунікації, такі як відеоконференції чи месенджери, не завжди забезпечують належний рівень занурення та взаєморозуміння між учасниками. У цьому контексті технології віртуальної реальності відкривають нові перспективи для створення умов більш природної присутності у віртуальному просторі, що є надзвичайно цінним для ефективної командної співпраці.

Попри значний потенціал VR у сфері колаборації, його впровадження обмежується низкою факторів. Серед основних – висока вартість сучасних VR-гарнітур, складність налаштування обладнання, а також потреба у потужному апаратному забезпеченні, що робить повноцінні VR-рішення недосяжними для багатьох невеликих компаній, навчальних установ або стартапів, які лише досліджують можливості віртуального середовища для командної роботи.

Сучасні VR-платформи пропонують широкий вибір інструментів для взаємодії, включаючи моделі з автономною роботою, трекінгом рухів і підтримкою мережевих сервісів. Проте більшість із них орієнтовані на користувачів з відповідним фінансовим або технічним ресурсом, що зумовлює необхідність пошуку альтернативних підходів, що дозволяють реалізувати ключові елементи VR-взаємодії за допомогою доступніших рішень.

Одним із таких варіантів є використання смартфонів у поєднанні з програмами віртуалізації зображення та недорогими VR-гарнітурами. Подібне рішення дає змогу оцінити практичну доцільність VR у командній роботі без значних витрат, що є важливим кроком для багатьох організацій на етапі тестування або прототипування VR-середовища.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ВИКОРИСТАННЯ VR-ТЕХНОЛОГІЙ У ВІДДАЛЕНІЙ СПІВПРАЦІ

1.1 Історичний розвиток концепції віддаленої взаємодії

Взаємодія між членами команд у давні часи була обмежена географічною близькістю та необхідністю синхронного контакту, оскільки всі процеси — як виробничі, так і управлінські — передбачали фізичну присутність працівників у єдиному просторі. Починаючи з промислової епохи XVIII століття, більшість трудових процесів вимагала чіткої ієрархії та централізованого контролю в межах одного простору, як-от фабрики чи цехи, де комунікація між учасниками була безпосередньою і лінійною. Незважаючи на те що в XX столітті з поширенням телефонного зв'язку та телеграфу з'явилися нові можливості для віддаленої координації — здебільшого в адміністративному управлінні — модель колективної діяльності все одно залишалася прив'язаною до концепції фізичної присутності, яка продовжувала домінувати в уявленнях про ефективну співпрацю [1-2].

Початок цифровізації – поява комп'ютерних мереж та електронної пошти. Кардинальні зміни у сприйнятті й практиці віддаленої взаємодії почалися лише з появою персональних комп'ютерів у 1980-х роках, коли поступово сформувалась концепція комп'ютеризованої обробки інформації, що дало змогу співробітникам виконувати низку інтелектуальних завдань незалежно від безпосереднього контакту з колегами, а поява локальних мереж (LAN) у 1990-х роках відкрила шлях до цифрової внутрішньокорпоративної комунікації (див. рис. 1.1).

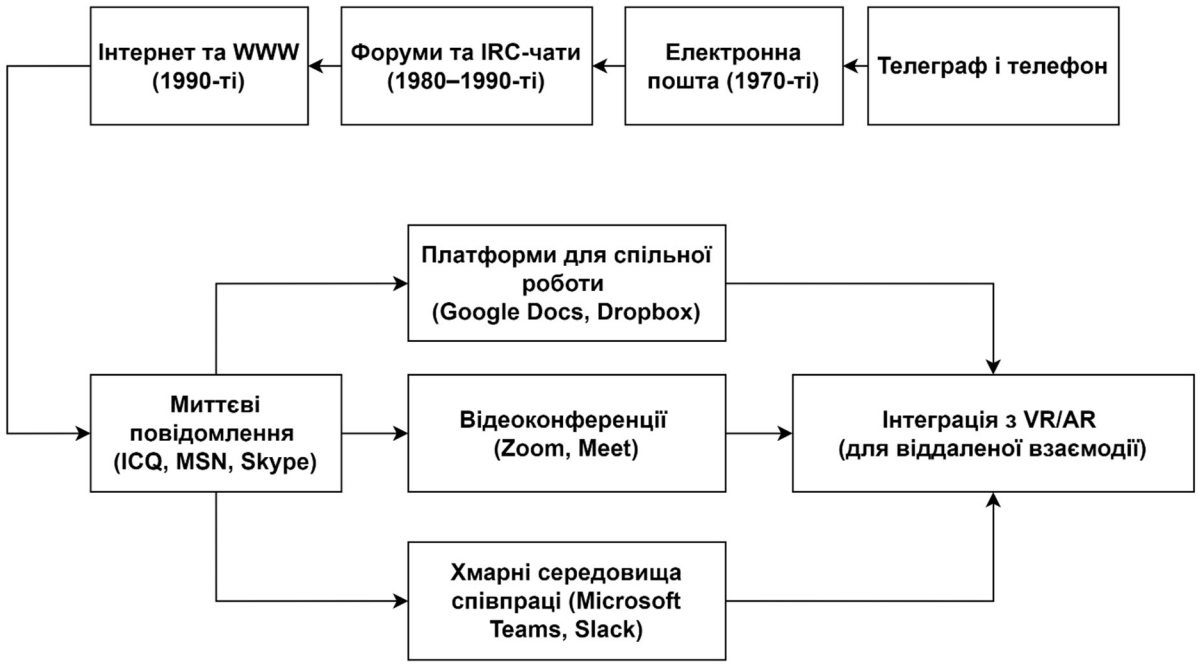


Рисунок 1.1 – Еволюція засобів цифрової комунікації

Найбільш суттєвий стрибок у розвитку віддаленої взаємодії відбувся із широким поширенням інтернету в середині 1990-х, коли електронна пошта, інтернет-релей чат (IRC), перші інструменти для веб-конференцій та FTP-сервери стали доступними широкому колу користувачів і започаткували перші віртуальні команди, що функціонували через мережеві сервіси (див. рис. 1.2) [1].

Саме на цьому етапі відбулося принципове переосмислення самого поняття командної взаємодії, оскільки з’явилися інструменти, які дозволяли організовувати спільну діяльність на відстані з відносно високою ефективністю. Водночас це супроводжувалося певними обмеженнями, зокрема:

— слабкою інтеграцією засобів комунікації;
— нестачею візуального;
— просторового контексту;
— недостатньою швидкістю з’єднань.

Це все робило координацію менш динамічною, ніж у реальному середовищі. Попри це, тренд на цифрову взаємодію продовжував зростати, що зрештою привело до розвитку концепції віртуальної присутності як спроби компенсувати недоліки традиційних віддалених засобів [1].

Поступове удосконалення цифрових технологій та потреба в ефективних, доступних рішеннях сприяли появі спрощених моделей віртуальної реальності, серед яких особливу увагу почали привертати варіанти з використанням звичайних смартфонів у поєднанні з програмами для стримінгу VR-зображення на ПК. Такі підходи дозволили мінімізувати витрати на апаратне забезпечення і стали реальною альтернативою дорогим VR-гарнітурам у контексті початкового впровадження віртуального середовища для віддаленої співпраці.

Глобалізація та хмарні сервіси – нова парадигма співпраці. Починаючи з 2000-х років XXI століття, інтенсивне зростання швидкості інтернет-з'єднання та поява хмарних технологій у 2010-х роках суттєво трансформували підхід до організації спільної діяльності, що дозволило планувати проєкти в режимі реального часу незалежно від фізичного розташування учасників. На цьому етапі стало можливим масштабне впровадження моделі розподілених команд, у межах якої співробітники з різних країн і часових поясів змогли працювати над спільними завданнями без помітної втрати продуктивності. Глобалізація економіки, зростаюча конкуренція та прагнення компаній зменшити витрати на офісні приміщення додатково посилили попит на дистанційну роботу, а технічний розвиток у сфері комунікацій забезпечив належну якість зв'язку, завдяки чому взаємодія між віддаленими працівниками стала значно ефективнішою та наблизилась до живого спілкування, що зробило подібну модель не лише можливою, а й конкурентоспроможною (див. рис. 1.2) [2].

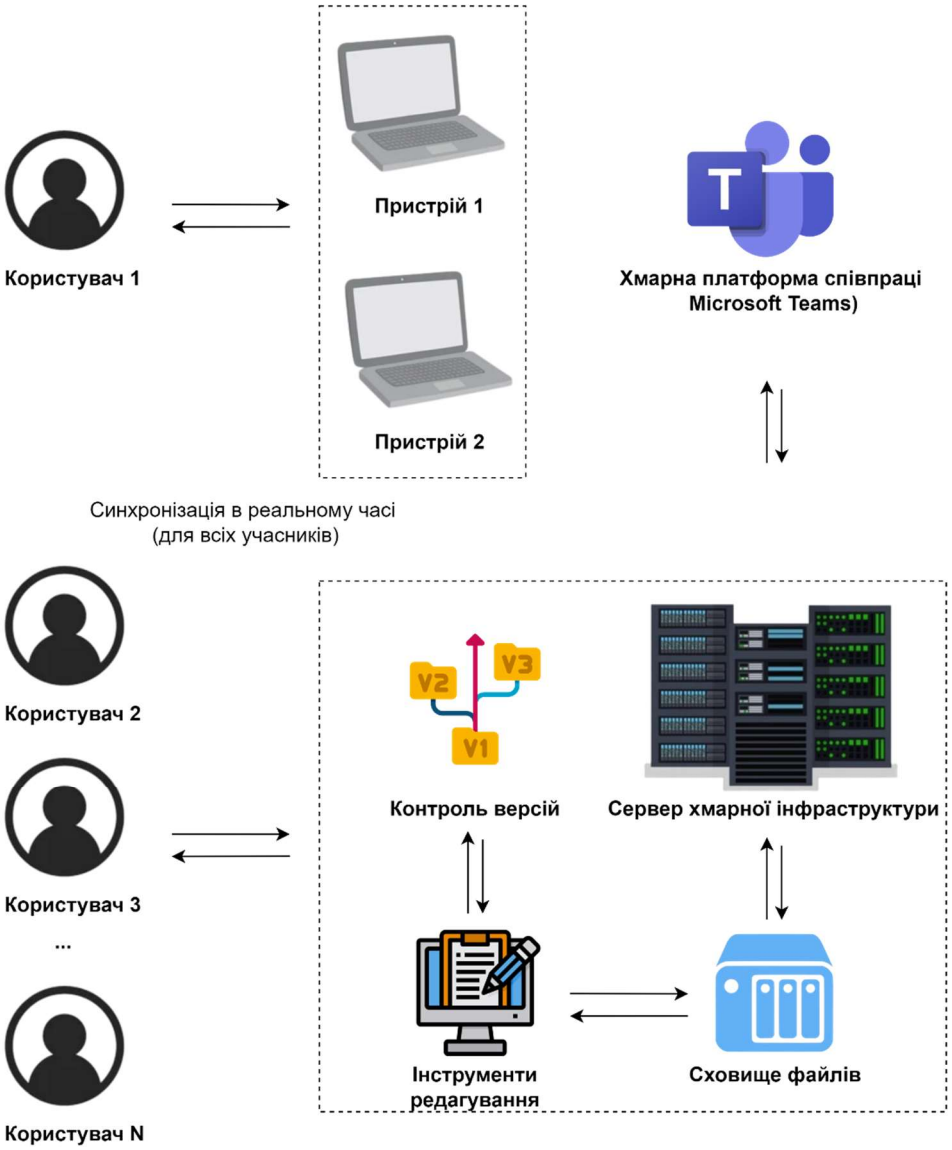


Рисунок 1.2 – Модель хмарної співпраці в командних середовищах

Пандемія COVID-19 – каталізатор цифрової трансформації. Водночас саме пандемія COVID-19, яка почалася у 2020 році, стала безпрецедентним каталізатором цифрової трансформації, адже спричинила миттєвий та вимушений перехід мільйонів працівників у всьому світі на віддалений режим. Тимчасові обмеження на фізичну присутність у робочих просторах перетворилися на масштабний глобальний експеримент, у межах якого було виявлено як переваги, так і слабкі сторони дистанційної роботи. Паралельно з цим зросла потреба не лише у вже наявних інструментах цифрової взаємодії, але й у принципово нових рішеннях, зокрема у впровадженні віртуальних середовищ, VR-конференцій та

імерсивних платформ, які здатні не просто передавати інформацію, а й створювати ефект спільної присутності. У відповідь на це компанії почали інвестувати в інфраструктури, що забезпечують відчуття реального контакту без фізичної присутності, а також дедалі частіше переглядати власні корпоративні політики, вводячи гібридні формати роботи, які поєднують дистанційну гнучкість із періодичними офлайн-зустрічами для посилення взаємодії (див. рис. 1.3) [3].



Рисунок 1.3 – Прискорення цифровізації під час пандемії COVID-19 [3]

Сьогодні віддалена співпраця перетворилася з тимчасової вимушеної практики на органічну частину цифрової культури, що інтегрується у стратегії компаній як сталий компонент сучасного управління. Така трансформація означає перехід від використання окремих інструментів до впровадження цілісних системних рішень, у межах яких віддалена робота не лише підтримує існуючі процеси, а й сприяє їхньому вдосконаленню. Технології віртуальної та доповненої реальності разом з імерсивними інтерфейсами стають дедалі більш актуальними, оскільки дозволяють створювати відчуття спільного простору, що є особливо важливим для командної роботи в умовах розподіленої присутності. Саме віртуальне середовище, створене за допомогою таких технологій, потенційно здатне повністю компенсувати відсутність фізичного офісу, забезпечивши при

цьому не лише комунікацію, а й спільну діяльність, навчання та неформальні взаємодії [3].

У цьому контексті питання розвитку VR-інструментів постає не лише як суто технічне завдання, а як комплексна проблема, що вимагає урахування соціальних, психологічних і управлінських аспектів. Реалізація віртуального робочого простору має базуватися на розумінні потреб учасників взаємодії, зокрема потреби у:

— фокусі;
— зворотному зв’язку;
— неформальному обміні інформацією;
— збереженні командної динаміки.

На початку такої реалізації необхідно дотримуватися високої якості візуального сприйняття, мінімальної затримки сигналу й адаптивного дизайну середовища. Одночасно з цим ефективність впровадження таких рішень залежить не лише від складності технологій, а й від доступності апаратних засобів, тому зростає інтерес до недорогих рішень, що використовують звичайні смартфони та стримінгове програмне забезпечення для VR-взаємодії [3].

1.2 Принципи та класифікація технології віртуальної реальності

Віртуальна реальність як технологічне явище є результатом багаторічної еволюції комп’ютерних систем, сенсорних інтерфейсів і візуалізаційних засобів, що розпочалась ще в середині XX століття, але лише в останні десятиліття вона отримала імпульс до масового впровадження. Спершу ці технології існували у вигляді великих, непрактичних установок, обмежених функціонально й доступних лише для спеціалізованих лабораторій, проте з розвитком мікропроцесорів, дисплеїв високої чіткості та сенсорів руху, VR-середовище стало доступним для звичайних користувачів. Суть віртуальної реальності полягає у створенні

змодельованого тривимірного простору, що дає змогу людині відчути фізичну присутність у штучно згенерованому середовищі, реагуючи на дії користувача в режимі реального часу. У такому контексті застосування VR не обмежується лише розвагами, адже ефект повного занурення, який формується завдяки просторовому звуку, реалістичній глибині зображення та можливості взаємодії з об’єктами у середовищі, відкриває нові горизонти для:

— командної роботи;
— навчання;
— медицини;
— інженерії;
— управління складними системами.

Ключовими характеристиками таких систем є:

— імерсивність;
— інтерактивність;
— реалістичність;
— синхронність.

Кожна з таких харакеристик має забезпечити максимально наближене до фізичної реальності сприйняття цифрового світу. Імерсивність досягається за рахунок занурення користувача в симульоване середовище, яке включає в себе не тільки зорові й слухові ефекти, але і просторове позиціювання, що дозволяє орієнтуватися у віртуальному просторі. Інтерактивність дозволяє змінювати об’єкти й середовище за допомогою рухів, жестів або голосу, а реалістичність, яка базується на складних алгоритмах фізики та деталізованій графіці, формує довіру до віртуального середовища як до умовно реального. Синхронність ж, як моментальна відповідь системи на дії користувача, залежить від частоти оновлення зображення та затримки виводу, і вона є вирішальною, адже у випадку затримок ефект занурення миттєво втрачається, викликаючи дискомфорт, а отже, нівелюючи сенс самої технології VR [4-5].

Класифікація VR-систем – автономні, стаціонарні та мобільні. Системи віртуальної реальності поділяються на кілька основних типів залежно від (див. рис. 1.4):

— архітектури;

— способу підключення;

— джерела обчислювальних ресурсів;

— мобільності.

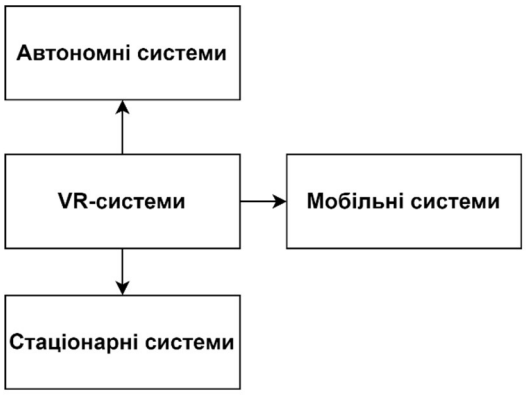


Рисунок 1.4 – Класифікація VR-систем за типом роботи

Найперше, автономні VR-системи, які здобули популярність у 2020-х роках, представляють собою повноцінні пристрої з вбудованими, часто модифікованими, операційними системами та обчислювальними модулями, що не потребують підключення до зовнішніх джерел, таких як комп’ютери чи смартфони. Прикладами таких пристроїв є Meta Quest 2 або 3, які працюють на модифікованій системі Android і дозволяють запускати VR-додатки безпосередньо на самій гарнітурі. Переваги цих систем – повна портативність, зручність у використанні, швидкість навчання та мінімальні вимоги до зовнішньої інфраструктури. Утім, незважаючи на автономність, такі гарнітури можуть підключатися до ПК для трансляції складніших симуляцій, однак навіть за таких умов вони стикаються з обмеженнями графічної продуктивності, адже вивід зображення з роздільною здатністю 4K (по 2K на кожне око) вимагає значних ресурсів і не кожен комп’ютер здатен забезпечити стабільні 60+ кадрів на секунду, що є критичним для

збереження ефекту реалістичності. Обмежена графічна деталізація й потужність процесорів у автономних VR-системах стає помітною при спробі запуску ресурсомістких додатків, і хоча технології постійно вдосконалюються, це все ще залишається одним із викликів [4-5].

Другим типом є стаціонарні VR-системи, які з самого початку орієнтовані на високу графічну якість і точність взаємодії. Вони підключаються до потужного ПК або консолі й використовують ресурси зовнішньої системи для обробки графіки й трекінгу. Пристрої на кшталт HTC Vive, Valve Index або Oculus Rift S демонструють:

— високий рівень реалістичності;
— підтримку складних сценаріїв взаємодії;
— глибоку інтеграцію з професійними симуляційними середовищами.

Водночас такі рішення обмежені в мобільності, вимагають провідного підключення та займають більше простору, а їхня вартість є суттєво вищою, що робить їх менш доступними для широкого кола користувачів. Попри це, саме такі системи часто використовуються у сфері:

— проєктування
— віртуального навчання
— тренажерів для складних професій

Саме там, де точність і повна деталізація є важливішими за зручність і мобільність.

Окремою категорією є мобільні VR-системи, що складаються з гарнітур, до яких вставляється смартфон, який і виступає джерелом графіки та обчислень. Рішення на кшталт Google Cardboard або Samsung Gear VR представляють собою найпростіші й найдешевші способи доступу до VR-контенту. Вони не мають власного дисплея чи системи трекінгу, а тому значно обмежені в функціональності, хоча дозволяють базово відчути занурення у віртуальне середовище. Останнім часом функціональність таких систем була суттєво розширена завдяки можливості транслювати зображення з ПК на смартфон через спеціалізовані додатки, зокрема Trinus VR, що дозволяє відтворювати повноцінні VR-додатки навіть на дешевших платформах. Перевагами мобільних рішень є низька вартість і доступність,

оскільки більшість людей уже мають смартфони, які можна використати для VR. Проте слабка продуктивність, відсутність точного трекінгу, обмежений контроль і низька частота оновлення зображення є критичними недоліками для складніших сценаріїв використання (див. рис. 1.5) [5].



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд автономних, стаціонарних
та мобільних VR-рішень: Meta Quest 3, HTC VIVE Pro 2 та VR Shinecon G10

Принципи формування віртуального простору у VR-середовищі. Формування тривимірного віртуального простору у VR-середовищах ґрунтується на сукупності фундаментальних технічних підходів, кожен з яких є критично важливим для досягнення переконливого ефекту присутності. Одним з базових принципів є рендеринг сцени в реальному часі, що забезпечує ілюзію глибини за рахунок стереоскопічного ефекту. Графічні рушії на кшталт Unity або Unreal Engine забезпечують високу частоту оновлення зображення — щонайменше 60 кадрів на секунду, що критично важливо для плавності відображення та запобігання появі нудоти чи головного болю, які можуть виникати у разі збоїв у синхронізації зору та руху. Таке навантаження вимагає від рушія стабільної обробки великого обсягу даних у режимі реального часу, що лягає на плечі потужного графічного та обчислювального забезпечення (див. рис. 1.6) [6].

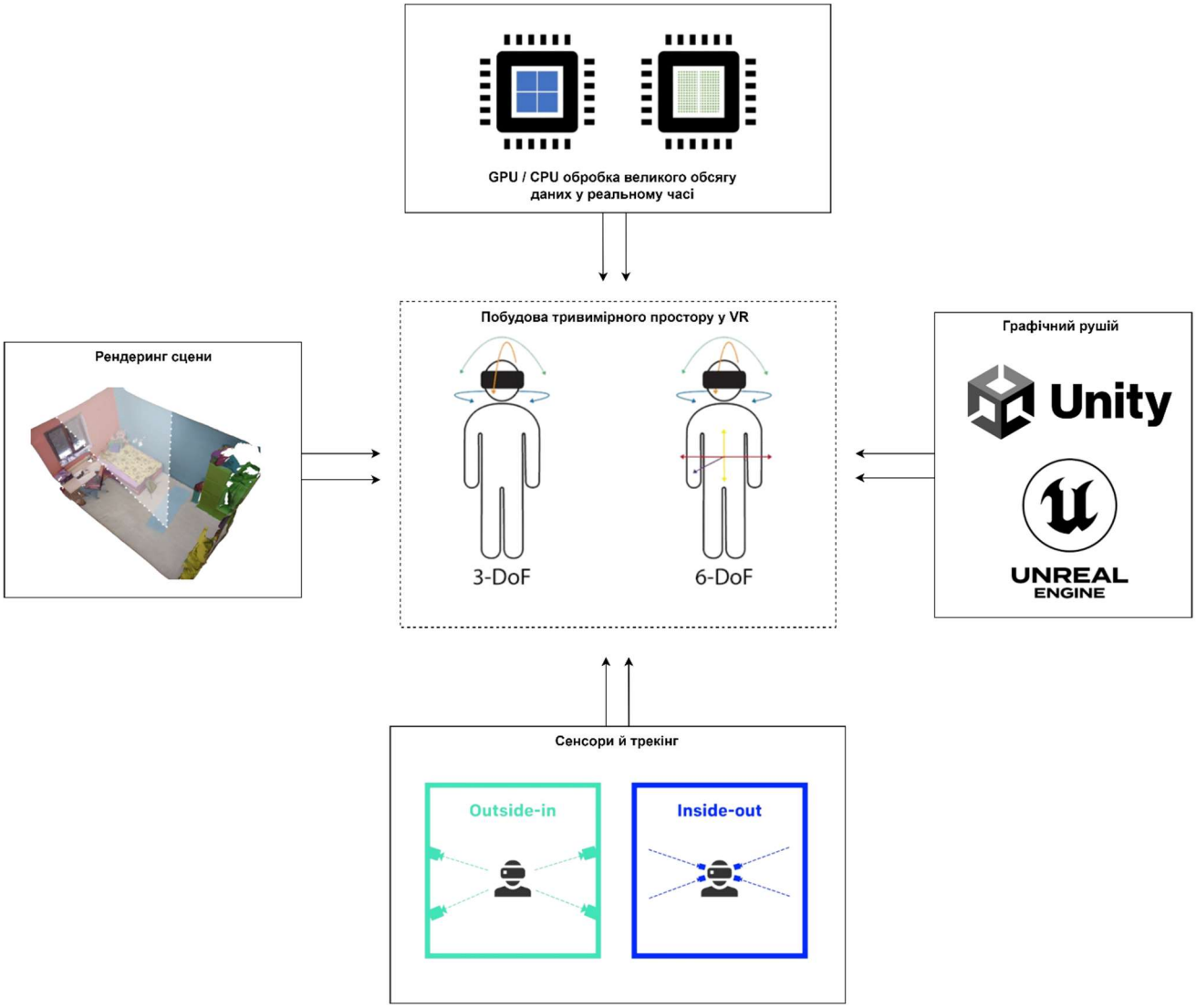


Рисунок 1.6 – Принцип побудови тривимірного простору у VR

Крім візуалізації, не менш значущим є трекінг положення користувача у просторі, що здійснюється за допомогою інерційних датчиків (IMU), камер глибини, інфрачервоних сенсорів та технологій LiDAR, які дозволяють зчитувати положення голови, рук і навіть всього тіла, а також будувати карту фізичного простору з метою уникнення зіткнень. У разі використання автономних VR-пристроїв усі необхідні сенсори інтегровані в сам шолом, тоді як деякі інші системи покладаються на зовнішні трекери або базові станції. Такий підхід дає змогу створити точне позиціонування та ефективну навігацію у віртуалізованому середовищі, забезпечуючи високий рівень занурення [6].

Наступним невід’ємним технічним аспектом виступає аудіо- та тактильна складова. Просторовий 3D-звук передається не лише через традиційні динаміки чи навушники, а й за допомогою кісткової провідності, що дозволяє адаптувати звучання відповідно до пози користувача в просторі. Крім того, деякі системи підтримують тактильний зворотний зв’язок у вигляді вібрацій або тиску, які реалізуються через контролери або рукавички, створюючи додаткову шар взаємодії з об’єктами. Усе це сприяє формуванню багатоканального сенсорного середовища, яке максимально наближене до реального сприйняття [6].

Ще одним важливим принципом є забезпечення синхронізації у інформаційно-комунікаційному середовищі, особливо у випадках, коли зображення передається з ПК на мобільний пристрій за допомогою стрімінгових додатків, наприклад Trinus VR. Тут критичне значення має мінімальна затримка та точна синхронізація з даними сенсорів руху, інакше можуть виникнути дезорієнтація та неприємні фізіологічні реакції. Високошвидкісні інтерфейси, такі як Wi-Fi 5 або 6, а також USB 3.0, дозволяють забезпечити достатню пропускну здатність для передачі зображення без втрат якості та з низьким пінгом.

Апаратні вимоги до VR-систем. Якщо перейти до апаратних вимог, то системи VR, які не є автономними, потребують комп’ютерів із високою обчислювальною потужністю (див. табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Апаратні вимоги для різних типів VR-систем

Тип VR-системи	**Основні апаратні вимоги**
PC-залежні системи	CPU: 4–8 ядер, підтримка багатозадачності GPU: VR Ready (NVIDIA RTX, AMD Radeon) RAM: ≥16 ГБ Відеовихід: DisplayPort 1.4 / HDMI 2.1
Мобільні рішення	Екран: ≥400 PPI, частота ≥60 Гц (бажано 90+) Сенсори: гіроскоп, акселерометр, магнітометр CPU: Snapdragon 845/Apple A12 або вище

Додаткові компоненти	Контролери руху Трекери / базові станції (SteamVR) Шоломи з роздільною здатністю від Full HD до 4K на око

Центральний процесор має мати щонайменше 4–8 ядер із підтримкою багатозадачності, відеокарта повинна бути сумісна з VR Ready специфікаціями — це можуть бути моделі серії RTX від NVIDIA або Radeon від AMD. Оперативна пам’ять повинна становити не менше 16 Гб, а відеовиходи — підтримувати інтерфейси типу DisplayPort 1.4 або HDMI 2.1 для передачі зображення високої чіткості та з низькою затримкою. Усе це необхідно для забезпечення стабільної, плавної та візуально якісної роботи VR-додатків, особливо у випадках високої роздільної здатності для кожного ока [7].

У контексті мобільного VR, зокрема рішень на основі смартфона, теж існує ряд вимог до пристрою. Щільність пікселів дисплея має становити щонайменше 400 PPI для уникнення ефекту «мильної» картинки, частота оновлення екрана — від 60 Гц, бажано 90 і вище. Смартфон повинен мати набір сенсорів, зокрема гіроскоп, акселерометр та магнітометр, що забезпечують базовий трекінг. Мінімальні вимоги до процесора — не нижче Snapdragon 845 або Apple A12, хоча найважливішим чинником лишається якість дисплея та стабільність з’єднання [7].

У випадках, коли VR-система не є повністю автономною, до апаратної частини додаються й зовнішні аксесуари, що забезпечують повноцінну взаємодію. Йдеться про контролери руху, які реалізують інтерактивні сценарії, трекери або базові станції, наприклад ті, що використовуються в системах SteamVR. Окремо варто згадати про самі шоломи та окуляри, роздільна здатність яких може варіюватися від Full HD до 4K для кожного ока, що є характерним, наприклад, для пристроїв високого класу на кшталт Apple Vision Pro. Такий рівень технічного оснащення дає змогу досягти максимальної реалістичності, зменшити візуальні артефакти та покращити загальний рівень присутності у віртуальному просторі.

1.3 Потенціал VR як засобу забезпечення колективної взаємодії

Однією з найхарактерніших особливостей віртуальної реальності є глибокий ефект присутності, що полягає у суб'єктивному відчутті перебування у просторі, відмінному від фізичного місця користувача, і саме в контексті колективної взаємодії це явище трансформується у поняття соціальної присутності, коли учасники починають сприймати один одного як реальних суб'єктів у єдиному цифровому середовищі, де відчуття спільної присутності забезпечується низкою технічних і психологічних засобів. Наприклад, аватарна репрезентація дозволяє відображати користувачів у вигляді аватарів, які здатні відтворювати положення тіла, жести, міміку, а іноді й рух губ чи напрям погляду залежно від функціональних можливостей конкретної VR-системи, що дозволяє створити ефект особистісного контакту. Просторовий звук, який функціонує завдяки 3D-позиціюванню, дає змогу чути співрозмовника у конкретному напрямку, як у реальному житті, що додатково посилює ефект спільної присутності. Синхронна взаємодія з віртуальними об'єктами дозволяє всім учасникам бачити наслідки дій інших у режимі реального часу, підвищуючи довіру у спілкуванні та ефективність взаємодії. Когнітивна ідентифікація, що полягає у зниженні психологічної дистанції між учасниками, спрощує неформальні комунікації, що є особливо важливим у спільній роботі, а відсутність звичних фізичних каналів невербального спілкування частково компенсується за допомогою VR-середовищ, що дозволяють зберігати природну взаємодію [8-10, 31].

Переваги тривимірного простору для командної взаємодії. На відміну від традиційних платформ для дистанційного спілкування, таких як Zoom або Teams, VR створює нову парадигму колективної роботи, у якій простір не є просто фоном, а стає активним інструментом для взаємодії. Просторова організація інформації дозволяє розташовувати:

— віртуальні дошки;

— нотатки;

— об’єкти;

— документи у тривимірному середовищі.

Тим самим це все полегшує візуальне сприйняття та структурування завдань. Можливість паралельної взаємодії надає змогу декільком користувачам працювати з різними об’єктами одночасно, не заважаючи один одному, що особливо корисно для команд, що працюють над складними проєктами. Віртуальний контекст середовища може бути адаптований під конкретні сценарії:

— переговорні кімнати;

— лабораторії;

— креативні простори;

— офіси відкритого типу.

Цим контекст стимулює асоціативне мислення і створює звичне середовище для творчих процесів. Маніпуляція з тривимірними моделями продуктів, кресленнями чи прототипами забезпечує нові форми взаємодії — можливість спільного редагування, масштабування або анімації, що значно розширює можливості візуального мислення та командної роботи (див. рис. 1.7) [8].

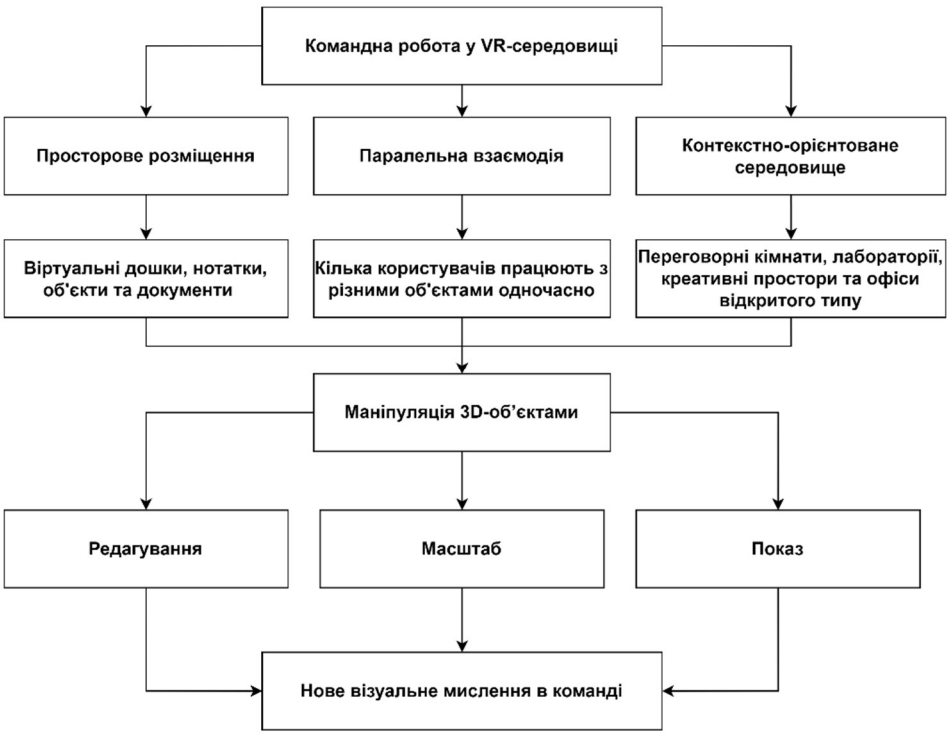


Рисунок 1.7 – Принцип командної роботи у VR-просторі

Функціональні можливості та сценарії використання – віртуальний офіс. Сучасні VR-рішення вже надають інструменти для побудови повноцінного віртуального офісу, де учасники можуть працювати синхронно у симульованому спільному просторі (див. рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Приклад віртуального офісу для спільної взаємодії: Horizon Workrooms (для VR-гарнітур Meta)

Наприклад, використання платформ на зразок Mozilla Hubs дозволяє створювати віртуальні кімнати з екранами, дошками, столами та просторами для обговорення поточних завдань, що імітує досвід фізичної присутності. Спільна робота з контентом — такими як PDF-документи, відео чи 3D-моделі — у віртуальному середовищі значно підвищує ефективність презентацій та колективної оцінки проєктів. Кожен учасник має змогу персоналізувати свій віртуальний робочий стіл, що дозволяє зручно концентруватися навіть за обмежених ресурсів у фізичному просторі. Неформальні зони — на кшталт віртуальних кавомашин або цифрових балконів — дозволяють реалізувати міжособистісну взаємодію, що часто є критично важливою для формування командної динаміки, а також забезпечити елементи соціального середовища, якого бракує у звичайних цифрових платформах. Окрім того, такі середовища легко масштабуються, можуть миттєво змінюватися та підтримують інтерактивну візуалізацію складних технічних

процесів, що робить їх особливо привабливими для креативних, технічних та наукових сфер (див. рис. 1.9) [9].



Рисунок 1.9 – Віртуальне робоче місце в VR-середовищі: Virtual Desktop

Актуальність VR для вирішення спільних робочих завдань. Віртуальна реальність набуває все більшої актуальності у сфері спільної роботи, оскільки її функціональні можливості вже давно виходять за межі сфери розваг і навчання, трансформуючись у серйозний інструмент професійної комунікації. Зокрема, після глобальної пандемії COVID-19, яка змусила багато компаній перейти на гібридні або повністю дистанційні формати роботи, зросла потреба у більш інтерактивних формах взаємодії, і VR виявився ефективним способом компенсувати обмеження звичайного відеозв'язку. Рішення на кшталт Meta Horizon та інших подібних платформ дозволяють створювати віртуальні середовища, що об'єднують міжнародні команди, незалежно від часових поясів чи фізичного розташування. У таких сферах, як інженерія, архітектура, машинобудування чи UX-дизайн, де особливу роль відіграє візуалізація і просторове сприйняття, VR забезпечує можливість одночасного перегляду і модифікації тривимірних об'єктів кількома учасниками, що значно підвищує точність і злагодженість колективних рішень. Окремо варто відзначити інклюзивність таких середовищ, оскільки завдяки

контролю за аватарами та гнучкому налаштуванню інтерфейсу VR може бути зручним і доступним навіть для людей з обмеженими фізичними можливостями, що є складним завданням у межах класичних офісів. Дослідження у цій сфері свідчать про те, що рівень ефективності комунікації у VR може не лише дорівнювати показникам фізичних зустрічей, а й перевищувати їх завдяки можливостям просторового мислення, зменшенню бар'єрів у спілкуванні та імітації природних сценаріїв співпраці, що підтверджує потенціал VR як одного з найперспективніших інструментів для забезпечення командної взаємодії у цифрову епоху [10, 31].

1.4 Соціально-психологічні аспекти використання VR у командній роботі

Використання віртуальної реальності у командній роботі значною мірою трансформує соціально-психологічну динаміку міжособистісної комунікації, адже на відміну від традиційних цифрових каналів на зразок відеозв'язку чи текстових месенджерів, VR дозволяє імітувати невербальні форми взаємодії, забезпечуючи глибше емоційне залучення та ефект спільної присутності. Така форма комунікації посилює виразність і вразливість, навіть за умов використання базових аватарів, оскільки інтонація, напрямок погляду, міміка й рухи тіла дають змогу ідентифікувати наміри та емоційний стан співрозмовника, що сприяє глибшому розумінню в команді. Просторова організація у віртуальному середовищі допомагає уникнути типових непорозумінь, властивих лінійним каналам спілкування, а також сприяє розвитку неформальних контактів: з'являється можливість для спонтанних соціальних взаємодій на кшталт розмов перед зустрічами, кулуарного спілкування чи обговорень між справами, що в реальності часто відбуваються у коридорах або біля кавомашини. Водночас VR створює безпечну дистанцію — учасники почуваються психологічно захищеними у

віртуальному середовищі, що позитивно впливає на командний клімат, знижує ризик емоційного вигорання та сприяє загальному психоемоційному комфорту [11-13].

Адаптація користувачів до віртуального середовища. Ефективність командної взаємодії у віртуальному просторі безпосередньо залежить від рівня адаптації користувачів до особливостей нового середовища, оскільки такий процес передбачає як технічне, так і психологічне пристосування до нових форм комунікації, просторової орієнтації та взаємодії. Первинним етапом є подолання бар'єру входження, що потребує базової технічної обізнаності, вміння працювати з інтерфейсами та комфортного ставлення до нових форматів, аби уникнути фізичного дискомфорту. Наступним є етап психомоторного звикання: користувачам необхідно освоїти навігацію, рухи, маніпуляції об'єктами, що часто викликає дезорієнтацію на початку. Далі формується соціальна адаптація — нове віртуальне середовище змінює правила невербальної взаємодії, дистанції, тривалості поглядів, тому виникає потреба у створенні неформального етикету, що базується на загальних правилах поведінки у VR-просторі. Успішна адаптація можлива лише за підтримки новачків і поступового впровадження з використанням доступних рішень, зокрема таких, як Trinus VR або подібні системи, які дозволяють працювати з недорогими гарнітурами через смартфон. Дослідження вказують на те, що адаптація відбувається швидше, коли віртуальні простори моделюються за знайомими сценаріями — з офісами, дошками, столами й кнопками, що відображають звичне фізичне робоче середовище (див. рис. 1.10) [11].



Рисунок 1.10 – Адаптація користувача до VR: етапи сприйняття

Подолання фізичної дистанції через ефект присутності. Однією з головних проблем дистанційної командної роботи є втрата відчуття спільного простору та міжособистісного контакту, проте VR здатна частково нівелювати ці бар’єри завдяки ефекту присутності, який синхронно долає фізичну дистанцію між учасниками. Учасники перебувають у спільному віртуальному середовищі, бачать позиції одне одного, можуть разом переміщуватись, взаємодіяти з об’єктами, створюючи ілюзію перебування в єдиній кімнаті. Індивідуальні аватари дозволяють кожному користувачу зберегти персоналізацію — навіть без відеозображення зберігається ефект присутності завдяки візуальним й аудіоатрибутам. Просторові особливості VR дозволяють паралельно вести кілька розмов у різних частинах віртуального офісу, як це зазвичай відбувається в реальності, а створення неформальних зон — lounge-просторів — забезпечує підтримку соціальних зв’язків у команді, що вкрай складно реалізувати за допомогою традиційних відеозустрічей. У результаті VR дозволяє досягати рівня взаємодії, наближеного до фізичної присутності, що позитивно впливає на довіру, командну згуртованість і сталість міжособистісних відносин (див. рис. 1.11) [12].



Рисунок 1.11 – Ефект присутності: механізм подолання фізичної відстані

Психологічні ризики – втома, залежність, когнітивне навантаження. Однак разом із перевагами VR несе в собі і певні психологічні ризики, які мають бути враховані при її впровадженні у робоче середовище. До них належать:

— втома від віртуального середовища;

— ризик формування залежності;

— підвищення когнітивного навантаження.

Одним з поширених ефектів є «кібернудота» (cybersickness), що виникає внаслідок розбіжності між візуальним сприйняттям та сигналами від вестибулярної системи, і може проявлятися у вигляді головного болю, нудоти або дезорієнтації, особливо у людей, чутливих до подібних стимулів. Ще одним викликом є когнітивне перевантаження — віртуальне середовище часто вимагає одночасної обробки просторової, візуальної та аудіоінформації, що змушує мозок працювати у постійному інтенсивному режимі, знижуючи продуктивність. Крім того, тривале використання VR може спричинити психологічну втому, оскільки користувачам необхідно постійно контролювати свої рухи, положення та жести, що потребує більших ментальних зусиль порівняно з пасивними способами комунікації. Уразливі користувачі можуть також сформувати деструктивну прихильність до віртуального середовища, сприймаючи його як втечу від реального життя, подібно до ігрової залежності (див. рис. 1.12).



Рисунок 1.12 – Психологічні ризики надмірного використання VR

Щоб уникнути цих ризиків, необхідно впроваджувати регламентовані сесії з обов’язковими перервами, створювати ергономічні інтерфейси, адаптовані до користувача, а також проводити просвітницьку роботу з цифрової гігієни. У робочому контексті доцільно використовувати VR-технології переважно для цільових зустрічей, що не потребують тривалих сесій, з акцентом на баланс між ефективністю й ментальним здоров’ям [13].

1.5 Аналіз сучасних технологічних рішень для організації VR-співпраці

В умовах віддаленої співпраці, які все активніше змінюють традиційну офісну культуру, зростає потреба у технологічних інструментах, здатних відтворити досвід фізичної присутності, і саме віртуальна реальність у цьому контексті розглядається як перспективне рішення, що дає змогу формувати ефективне віртуалізоване середовище взаємодії. Хоча технологія VR уже зарекомендувала себе у сфері розваг, поступово вона закріплюється і як платформа

для професійної колаборації, проте ринок відповідних рішень є неоднорідним і охоплює як високотехнологічні системи, орієнтовані на корпоративний сегмент, так і прості користувацькі платформи, доступні на мобільних пристроях, що створює необхідність системного аналізу основних типів VR-платформ, їхніх можливостей і обмежень у контексті організації командної віддаленої роботи [14-17].

Платформи для колективної VR-взаємодії. Серед найбільш поширених рішень для колективної VR-взаємодії на перший план виходить Horizon Workrooms, розроблена компанією Meta для гарнітур Quest, що забезпечує високу якість графіки, трекінг рук, просторовий звук, можливість презентацій у віртуальній кімнаті та реалістичну візуалізацію, проте її головним обмеженням залишається вимога наявності саме гарнітур Meta, без яких функціонал залишається недоступним. Альтернативним рішенням виступає Spatial — платформа, що підтримує як VR, так і AR-режими, дозволяє організовувати презентації та спільні наради в адаптованих 3D-просторах, підтримуючи кросплатформність, проте для її стабільної роботи необхідне високошвидкісне інтернет-з’єднання, без якого функціональність знижується. Mozilla Hubs — ще один приклад відкритої платформи, що працює через браузер із використанням WebVR, має низький поріг входу та не потребує спеціалізованого обладнання, що робить її зручною для простих, неформальних комунікацій, хоча і з обмеженою якістю графіки та функціоналу [14].

VRChat, попри свою орієнтацію на соціальну взаємодію та розваги, іноді використовується для неформальних командних зустрічей завдяки кастомізації аватарів і підтримці скриптів, однак для професійного середовища вимагає додаткових налаштувань і модифікацій. Прикладом платформи, яка намагалася поєднати соціальне і бізнес-середовище, був AltspaceVR, який до припинення роботи демонстрував як потенціал, так і складнощі впровадження VR у корпоративну комунікацію, що вкотре підкреслює нестабільність ринку в цьому сегменті [14].

Таблиця 1.2 – Порівняння платформ для колективної VR-взаємодії

Платформа	**Основні особливості**	**Обмеження / Недоліки**
Horizon Workrooms	Висока якість графіки, трекінг рук, просторовий звук, віртуальні презентації	Працює лише з гарнітурами Meta Quest
Spatial	Підтримка VR/AR, презентації, 3D-простори, кросплатформність	Вимагає стабільного високошвидкісного інтернету
Mozilla Hubs	Працює через браузер, не потребує спеціального обладнання, низький поріг входу	Обмежена графіка та функціональність, проєкт припинено
VRChat	Кастомізація аватарів, підтримка скриптів, можливість неформальних зустрічей	Орієнтація на розваги, потребує додаткових налаштувань для професійного вжитку
AltspaceVR	Поєднання бізнесу і соціального VR, базовий корпоративний функціонал (платформа закрита)	Нестабільність ринку, проєкт припинено
BigScreen BETA	Безкоштовне, підтримує перегляд екрана ПК у VR, спільний перегляд, мінімальні вимоги	Обмежений набір функцій для роботи в команді, немає вбудованих інструментів співпраці

При виборі VR-платформи (див. табл. 1.2) для організації колективної віддаленої роботи доцільно враховувати кілька ключових параметрів, зокрема доступність рішень і простоту входження для новачків, що включає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, якість графіки та рівень занурення завдяки трекінгу рухів і підтримці просторового аудіо, наявність інструментів для спільної роботи з файлами або віртуальними об’єктами, сумісність із різними типами пристроїв,

зокрема смартфонами, ПК, гарнітурами, а також наявність функцій модерації, приватності й безпеки, які є критичними для ефективної та етично безпечної співпраці в середовищі, де стираються фізичні межі між учасниками (див. рис. 1.13) [14].



Рисунок 1.13 – Популярні VR-платформи для віддаленої співпраці

Сильні та слабкі сторони різних типів VR-систем. Розгляд основних типів VR-систем, які використовуються для віддаленої співпраці, вимагає порівняння їх за критеріями ефективності, вартості, масштабованості та зручності використання, що дозволяє сформувати комплексне уявлення про доцільність їхнього застосування в різних сценаріях. Одним із найбільш поширених типів є автономні VR-системи на кшталт Meta Quest, які мають інтегровані датчики трекінгу, не потребують підключення до ПК, підтримують широкий спектр VR-додатків і забезпечують відносну мобільність, що робить їх зручними у використанні для невеликих команд. Проте обмежена потужність обробки графіки, залежність від ємності акумулятора, вартість самих гарнітур та замкненість екосистеми

створюють певні бар’єри, особливо в ситуаціях, де критичною є відкритість платформ або потреба в адаптації під специфічні задачі [15].

Далі, у категорії високопродуктивних VR-систем, таких як HTC Vive або Valve Index, перевагами є висока якість графіки, мінімальна затримка, підтримка професійного програмного забезпечення та наявність точних трекінгових систем, що дозволяє реалізовувати найскладніші віртуальні сценарії з максимальною реалістичністю. Однак ці системи потребують значних фінансових витрат, складного налаштування, потужного комп’ютера і достатнього фізичного простору, що суттєво обмежує можливість їхнього використання поза межами корпоративних або науково-дослідних структур [15].

У свою чергу, найбільш доступним варіантом є мобільні VR-рішення, серед яких Google Cardboard, Trinus VR і подібні системи, що поєднуються зі смартфонами. Основними їхніми перевагами є надзвичайно низька вартість, широка доступність, простота в налаштуванні та використанні, а також те, що більшість користувачів вже володіють пристроями, які задовольняють мінімальні технічні вимоги. До того ж гарнітури з картону або пластику коштують лише кілька доларів, а програмне забезпечення на кшталт Trinus VR дозволяє швидко транслювати зображення з комп’ютера на смартфон через Wi-Fi або USB без необхідності в складній конфігурації. Додатковою перевагою є сумісність із вже існуючими десктопними застосунками, навіть тими, що не були створені з розрахунку на VR, що розширює потенційні сценарії використання.

Натомість до недоліків таких мобільних рішень належать відсутність точного трекінгу, оскільки орієнтація в просторі забезпечується лише за допомогою гіроскопа смартфона, що не забезпечує високої точності. Також при передачі зображення у високій якості можливе перегрівання смартфона або виникнення затримок, а візуальна якість та поле зору значно поступаються повноцінним гарнітурам. Обмежена деталізація дисплея та відсутність повного ефекту занурення створюють відчутну різницю в користувацькому досвіді, однак у багатьох випадках ці недоліки є прийнятною ціною за загальну доступність і простоту впровадження [15].

Обмеження повноцінних VR-гарнітур у масовому доступі. Попри визнані переваги повноцінних VR-гарнітур, у тому числі автономних і високопродуктивних, їх широкомасштабне застосування в масових сегментах, зокрема в освіті, малому бізнесі або серед віддалених фрілансерів, досі ускладнюється низкою чинників. Головним бар'єром залишається висока вартість — вартість однієї гарнітури може сягати від 500 до 1500 доларів, що робить їх недоступними для багатьох установ, особливо у випадках, коли потрібне одночасне:

— складнощі з налаштуванням;
— необхідність постійного оновлення програмного забезпечення;
— коректне підключення трекерів;
— сумісність із системами користувача.

Просторові вимоги, зокрема потреба у достатньо вільному та освітленому місці, також суттєво звужують спектр можливого використання. Додатково існує фактор фізичного дискомфорту, пов'язаний із тривалим використанням VR-гарнітур:

— можливе перенавантаження очей;
— дезорієнтація у просторі;
— зниження концентрації;
— загальна втома.

Тим самим – вимагає обмеження часу перебування у віртуальному середовищі [16].

Потенціал мобільних VR-рішень у контексті офісної роботи. У цьому контексті інтерес до мобільних VR-рішень стрімко зростає, особливо у випадках, коли необхідне швидке, економне й просте впровадження інструментів віртуальної присутності для дистанційної роботи або навчання. Мобільні рішення на зразок Trinus VR, що використовують звичайний смартфон як основний дисплей, створюють мінімальні технічні та фінансові вимоги, відкриваючи можливості для створення VR-середовища навіть на базовому рівні. Завдяки можливості запуску повноцінних настільних застосунків через просту трансляцію з ПК та використанню широко доступних матеріалів для виготовлення гарнітури, такі

рішення можуть забезпечити мінімально необхідний рівень занурення без потреби у значних інвестиціях (див. рис. 1.14).

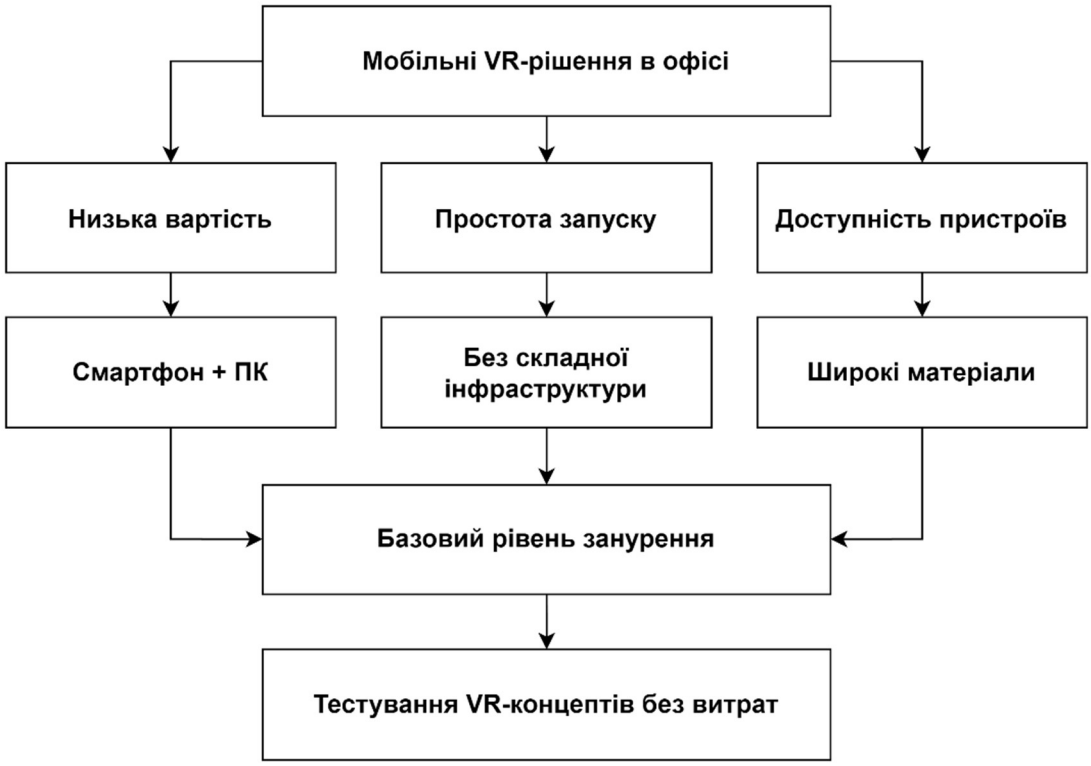


Рисунок 1.14 – Переваги мобільних VR-рішень для офісного застосування

Хоча точність трекінгу, якість зображення та рівень інтерактивності в цьому випадку обмежені, в умовах обмеженого бюджету, технічних ресурсів або необхідності тестування концепту VR-взаємодії саме такі підходи формують міст між концептуальною ідеєю повномасштабного VR-офісу та реальною можливістю її практичного застосування [17].

РОЗДІЛ 2 ТЕХНІЧНІ ТА ІНЖЕНЕРНІ ПІДХОДИ ДО РЕАЛІЗАЦІЇ VR-СЕРЕДОВИЩА

2.1 Архітектура інтегрованої системи віртуальної взаємодії

Для реалізації концепції доступної VR-співпраці доцільно сформувати архітектуру, що базується на використанні (див. рис. 2.1):

— персонального комп’ютера як сервера;

— картонну чи пластикову VR-гарнітуру;

— смартфона як клієнтського візуалізатора.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд інтегрованої системи віртуальної взаємодії: ПК як сервер, смартфон як клієнт

Такий підхід дозволяє забезпечити основну функціональність повноцінного VR-середовища без значних фінансових витрат і складних технічних вимог. Детальне вивчення компонентів цієї архітектури, ролі обраного програмного забезпечення – зокрема Trinus VR – у забезпеченні з’єднання між пристроями, а також функціональних можливостей самої гарнітури в контексті створення ефекту присутності, дає змогу розглядати це рішення як доступний варіант занурення у віртуальну реальність, який значно перевершує початкові мобільні експерименти

та наближається до якості комерційних VR-рішень, хоч і з певними компромісами [18-19].

Модель побудови системи – ПК як сервер, смартфон як клієнт. Побудова системи передбачає двокомпонентну модель, де персональний комп'ютер виконує роль сервера, що обробляє графіку, рендерить тривимірні сцени та керує логікою VR-додатків, а смартфон виступає клієнтським пристроєм, який виводить оброблене зображення у VR-режимі. Передача даних відбувається через USB або Wi-Fi, а сам смартфон розміщується у простій VR-гарнітурі типу картборд, зокрема моделі Esperanza 3D VR EMV 400, яка підходить для більшості сучасних смартфонів діагоналлю 4,7–6 дюймів. Ця гарнітура утримує смартфон за допомогою жорсткого пластикового фіксатора, що забезпечує стабільність і безпечне використання, на відміну від деяких ранніх моделей, у яких пристрій міг випадати (див. рис. 2.2) [19].



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд мобільної VR гарнітури Esperanza 3D VR EMV 400

Основна перевага такого підходу полягає в тому, що всі обчислення виконуються на ПК, зменшуючи вимоги до продуктивності самого смартфона. У порівнянні з нативними VR-додатками для Android, які зазвичай мають низькополігональну графіку і обмежений функціонал, передача зображення з ПК дозволяє користувачеві зануритись у значно складніші й якісніші віртуальні середовища. Завдяки розвитку екранів смартфонів, зростанню їх роздільної

здатності та покращенню якості зображення, мобільні VR-рішення наближаються за параметрами до комерційних VR-гарнітур, які використовують власні дисплеї, і в окремих випадках навіть перевершують окремі стаціонарні моделі, що потребують виключно провідного підключення.

Системи, в яких VR-гарнітури є лише дисплеями, підключеними до комп'ютера без автономного функціонування, частково поступаються за гнучкістю, адже смартфони продовжують еволюціонувати і візуальна якість, яку вони забезпечують, вже дозволяє досягати вражень, наближених до повноцінної віртуальної реальності. З урахуванням вартості самого картборду – навіть якщо він не картонний, як ранні версії від Google, а виконаний із пластику, – витрати залишаються мінімальними, що робить це рішення надзвичайно привабливим для офісного використання, командної співпраці та навчання.

Ключовими перевагами архітектури є гнучкість у виборі VR-додатків, сумісних із ПК, а також доступність смартфонів, що вже є у більшості користувачів. Такий підхід дозволяє не лише персоналізувати віртуальний досвід, а й ефективно масштабувати систему під потреби кількох користувачів, які можуть одночасно підключатися до єдиного серверного середовища за умови коректної мережевої конфігурації, що відкриває перспективи широкого використання VR у щоденній дистанційній взаємодії (див. рис. 2.3).

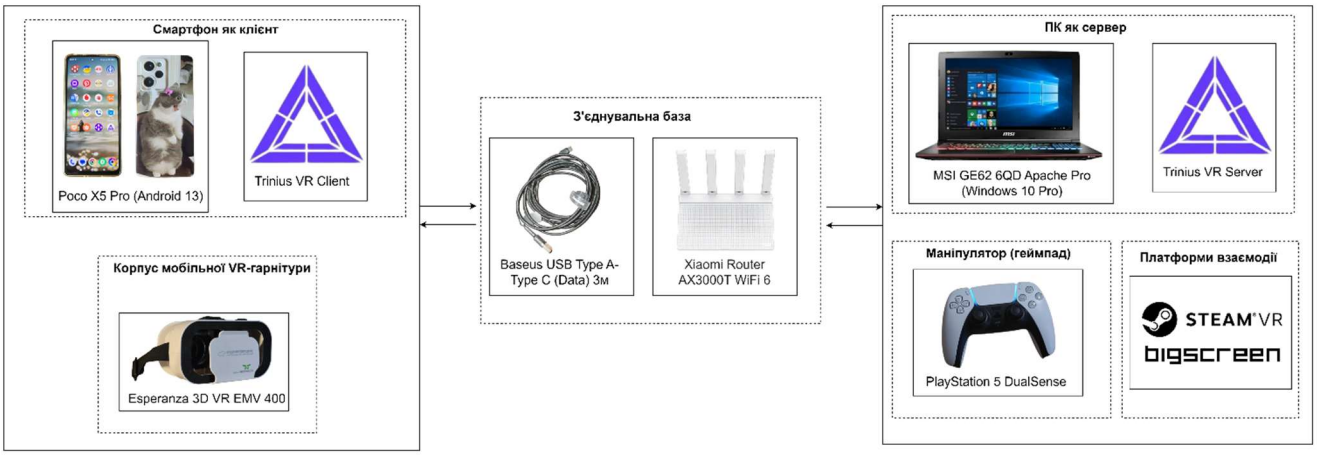


Рисунок 2.3 – Архітектура інтегрованої системи віртуальної взаємодії на основі Trinus VR та смартфона

Технологічна роль Trinus VR у передачі VR-контенту. Trinus VR виконує технологічну функцію передавання віртуального контенту завдяки своїй двокомпонентній архітектурі, що складається з програмного модуля на стороні комп'ютера та клієнтського додатку для мобільних пристроїв. Серверна частина встановлюється на ПК, перехоплює відеосигнал з екрана, зокрема з VR-додатків, стискає його й передає через мережу. На іншому боці система має клієнтську частину — Android застосунок (лише ручне встановлення через «менеджер інсталяції»), що приймає цей стиснений потік, декодує його та відображає у форматі стереопари для лівого і правого ока. Одночасно з цим передаються дані акселерометра та гіроскопа зі смартфона назад до ПК, забезпечуючи синхронізацію рухів голови користувача з положенням камери у віртуальному середовищі, що дає змогу реалізувати базову функціональність "head tracking" без додаткових зовнішніх сенсорів (див. рис. 2.4) [18].

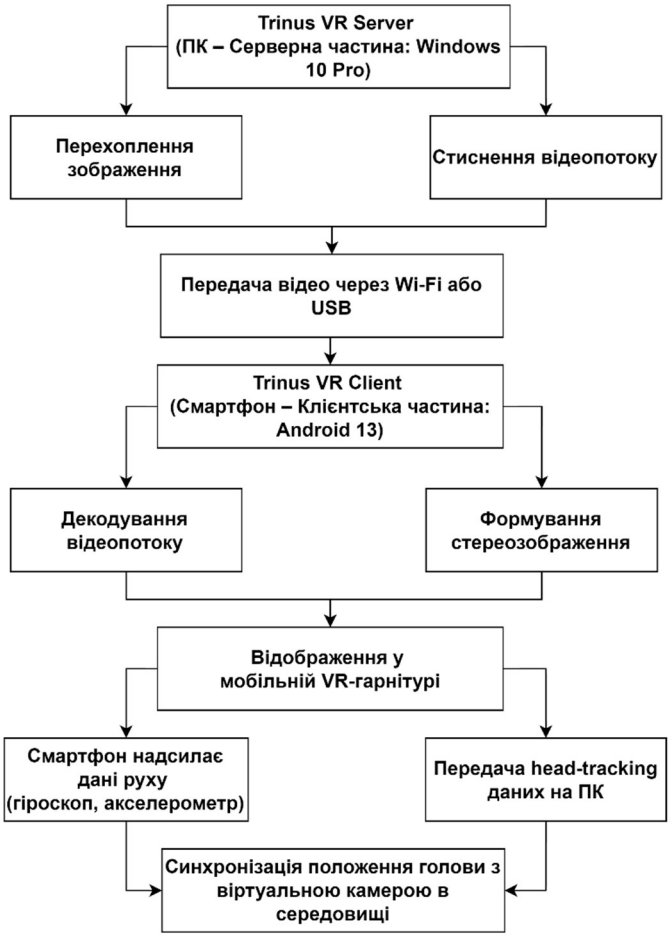


Рисунок 2.4 – Зв'язок між компонентами системи візуалізації

У цій моделі смартфон виступає не лише як дисплей, а й як повноцінне джерело сенсорної інформації, що у поєднанні з Trinus VR створює умови для побудови автономної VR-системи з можливістю руху та орієнтації у просторі. На відміну від професійних гарнітур, які вимагають встановлення зовнішніх датчиків для відстеження позиції, тут уся сенсорна обробка реалізована на самому смартфоні, що повертає відповідні дані на комп'ютер. Таким чином забезпечується ефективне занурення в середовище без суттєвих апаратних витрат.

Режими підключення Trinus VR — USB та Wi-Fi — дозволяють обирати між стабільністю з'єднання та мобільністю користувача. USB-підключення забезпечує мінімальні затримки, однак обмежує рухливість, тоді як Wi-Fi режим, особливо при використанні сучасних стандартів Wi-Fi 6, 6E або 7, забезпечує достатню пропускну здатність для комфортного перегляду VR-контенту навіть безпровідним способом. Крім того, Trinus VR підтримує імітацію SteamVR, що дозволяє запускати не лише VR-ігри, а й додатки для спільної роботи та віддаленої взаємодії, перетворюючи систему з інструменту для розваг на функціональну платформу для навчання та колаборації [18].

Додаткові можливості додатка включають:

— графічні налаштування;

— масштабування;

— корекцію викривлень;

— створення індивідуальних профілів.

Таблиця 2.1 – Основні функціональні можливості та переваги Trinus VR

Характеристика	**Опис**
Архітектура	Двокомпонентна: сервер на ПК + клієнтський додаток на смартфоні
Передача відео	Стиснення відеосигналу на ПК і передача на мобільний пристрій у форматі стереопари

Продовження таблиці 2.1 – Основні функціональні можливості та переваги Trinus VR

Характеристика	**Опис**
Зворотний зв’язок	Передача даних акселерометра і гіроскопа для head tracking
Сенсорна інтеграція	Смартфон виконує роль дисплея та сенсорного пристрою
Режими підключення	USB (низька затримка) та Wi-Fi (вища мобільність, особливо з Wi-Fi 6/6E/7)
Підтримка платформ	Імітація SteamVR — можливість запуску VR-додатків і спільної роботи
Додаткові функції	Налаштування графіки, масштабування, корекція викривлень, створення профілів користувача
Основні переваги	Низька вартість, можливість кастомізації, придатність для навчання та експериментів

Таким чином це дозволяє налаштувати відображення з урахуванням особистих уподобань та характеристик використовуваного пристрою, що перетворює додаток на гнучкий інструмент кастомізації, де кожен користувач формує власний підхід до візуального представлення VR-середовища (див. табл. 2.1). Хоча така система вимагає певних початкових налаштувань, її відкритість і низька вартість створюють умови для широкого експериментального використання, зокрема в освітніх або наукових цілях, коли потрібна імітація VR-середовищ без придбання дорогого обладнання [18].

Роль мобільної гарнітури як інтерфейсу візуалізації. У цій архітектурі особливу роль відіграє мобільна VR-гарнітура, яка фактично є носієм усієї візуалізації (див. табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Основні характеристики та функціональна роль мобільної VR-гарнітури в системі візуалізації

Характеристика	Опис
Тип гарнітури	Мобільна, з корпусом типу Google Cardboard (модель Esperanza 3D VR EMV 400)
Сумісність	Смартфони з діагоналлю 4,7–6 дюймів
Вартість	Приблизно $7.5
Конструктивні переваги	Пластиковий тримач, гумові прокладки, широке поле зору (до 90°)
Регулювання	Міжлінзова відстань (55–72 мм), глибина посадки
Роль у системі	Виведення стереопари зображень, створення ефекту об’ємного бачення
Значення для VR-досвіду	Створення псевдо-VR ефекту, що забезпечує занурення без дорогого обладнання
Сфера застосування	Віддалена співпраця, освіта, імітація присутності

Смартфон, поміщений у корпус гарнітури типу Google Cardboard, стає центральним елементом, що сприймає і транслює VR-контент. У даному випадку використано бюджетну модель Esperanza 3D VR EMV 400, сумісну зі смартфонами з діагоналлю від 4,7 до 6 дюймів. Незважаючи на низьку вартість — приблизно $7.5 — гарнітура має важливі конструктивні особливості, зокрема надійний пластиковий тримач, що фіксує смартфон і запобігає його випадінню навіть при різких рухах голови, що є суттєвою перевагою над моделями з магнітним кріпленням, де ризик випадання смартфона залишається високим [19].

Окрім цього, гарнітура підтримує регулювання міжлінзової відстані в діапазоні 55–72 мм, а також глибини посадки, що дозволяє адаптувати пристрій до різних користувачів. Конструкція включає гумові прокладки, що запобігають деформації корпусу та надають додаткової стійкості. Пристрій має широке поле зору — до 90°, що формує ефект присутності, дозволяючи повністю зануритися у віртуальне середовище. Смартфон, розміщений у гарнітурі, виводить стереопару

зображень, які візуально сприймаються як об’ємна сцена, а отже гарнітура, хоч і є пасивним елементом, відіграє критично важливу роль у формуванні VR-досвіду. У такому вигляді система створює ілюзію повноцінного VR, яку доречно називати «псевдо-VR», однак вона повною мірою працює і може бути інтегрована в сценарії спільної роботи на відстані, навчання або імітації присутності, відкриваючи доступні й ефективні рішення там, де використання дорогого обладнання є економічно недоцільним [19].

Схема взаємодії компонентів системи. Для глибшого розуміння архітектури системи доцільним є формування цілісної логічної схеми, яка описує послідовну взаємодію між апаратною частиною та програмним забезпеченням, і така схема демонструє не лише послідовність обміну даними, а й функціональну структуру в динаміці, що формує цілісний механізм візуалізації та зворотного зв’язку. На початковому етапі персональний комп’ютер генерує VR-сцену у форматі стереопари, яка містить зображення для обох очей, після чого Trinus VR Server захоплює екран, стискає відеопотік і передає його на клієнтський пристрій, тобто смартфон, через USB або Wi-Fi, залежно від обраного режиму підключення. Смартфон у свою чергу приймає цей потік, розпаковує його і виводить на екран у вигляді двох синхронізованих зображень для лівого та правого ока, розташованих горизонтально, що дозволяє гарнітурі створити ефект глибини і простору.

У момент перегляду відео на смартфоні відбувається паралельний процес збору інформації з вбудованих сенсорів — гіроскопа та акселерометра, що фіксують найменші зміни положення голови користувача у просторі. Ці дані миттєво передаються назад до Trinus VR Server, що працює на ПК, де обробляються і трансформуються у відповідні зміщення віртуальної камери, забезпечуючи ілюзію природної взаємодії з тривимірним середовищем у режимі реального часу. Таким чином формується повноцінний цикл передачі та обробки даних, що забезпечує ефект присутності і дозволяє реалізувати базовий "head tracking", без додаткового обладнання на кшталт зовнішніх датчиків позиціонування чи камер.

Цей механізм зворотного зв’язку дозволяє розглядати всю систему не просто як периферійну конструкцію для перегляду VR-контенту, а як майже автономну

гарнітуру, де смартфон виступає одночасно і клієнтським пристроєм, і модулем обчислення рухів голови, тобто частково бере на себе функції дорогих VR-шоломів. Завдяки цьому створюється середовище, що, попри свою простоту, наближається до досвіду, який зазвичай можна отримати лише за допомогою професійного обладнання, з тією відмінністю, що вартість реалізації знижується у рази. Принципова архітектура системи передбачає роботу в обох режимах — як з провідним, так і безпровідним підключенням, де перше надає перевагу у стабільності зображення і низькій затримці, а друге дозволяє досягти більшої свободи руху, що особливо важливо для задач дистанційної співпраці, віртуальних зустрічей чи освітніх симуляцій [19].

Візуальне уявлення такої взаємодії можна відтворити у вигляді схеми, де кожен компонент виконує чітко визначену роль:

1. VR-додаток на ПК створює сцену.
2. Trinus VR Server передає стиснутий потік.
3. Trinus VR Client на смартфоні відображає отриманий потік.
4. Сенсори смартфону безперервно інформують сервер про зміну положення голови, формуючи повноцінну систему зворотного зв’язку.

За відсутності необхідності в дорогому обладнанні ця архітектура демонструє практичний спосіб реалізації VR-досвіду на базі доступних засобів і дозволяє адаптувати його до широкого спектра задач — від навчальних до презентаційних, що робить її оптимальним вибором у середовищах з обмеженими ресурсами.

2.2 Технічні характеристики та вимоги до пристроїв і програмних засобів

Функціонування системи VR-взаємодії базується на взаємодії декількох ключових компонентів, зокрема:

— персонального комп’ютера у ролі сервера;

— мобільного пристрою (зазвичай смартфона);

— VR-гарнітури (типу Google Cardboard);

— спеціалізованого програмного забезпечення (TrinusVR).

Враховуючи характер роботи системи, яка передбачає візуалізацію складних тривимірних сцен у режимі реального часу, передачу зображення без затримок, синхронізацію рухів голови та обробку значного обсягу даних, існує потреба у чіткому визначенні технічних характеристик, які має відповідати кожен з пристроїв у ланцюзі. Особлива увага приділяється апаратним ресурсам серверної частини, адже саме комп'ютер виконує основну обчислювальну роботу:

— рендеринг графіки;

— кодування відеопотоку;

— обробку зворотного зв'язку;

— мережеву передачу.

Продуктивність цієї частини напряму впливає на стабільність та якість VR-досвіду, і у випадку її недостатності можуть виникати:

— затримки;

— просідання частоти кадрів;

— розсинхронізація аудіо-візуального контенту;

— втрата ефекту занурення.

Тому апаратна конфігурація комп'ютера повинна відповідати щонайменше мінімальним вимогам, визначеним специфікацією Trinus VR, яка використовується у реалізації цієї архітектури [20-23].

Мінімальні параметри ПК для запуску VR-додатків. Процесор повинен бути не нижче Intel Core i5 шостого покоління або AMD Ryzen 5 з підтримкою щонайменше чотирьох фізичних ядер і багатопоточності, оскільки саме CPU відповідає за обробку логіки віртуального середовища, розрахунок просторових координат, стискання зображення та координацію програмних потоків. Відеокарта також має суттєве значення, адже саме вона несе основне навантаження з рендерингу сцен і повинна забезпечувати стабільну частоту кадрів на рівні не менше 60 fps, тому мінімально допустимим варіантом є Nvidia GeForce GTX 1050

Ti або AMD RX 570, хоча для комфортної роботи рекомендовані GTX 1660 або RTX 2060 і вище. Обсяг оперативної пам’яті повинен складати щонайменше 8 ГБ, однак для одночасного запуску VR-додатку, Trinus VR сервера, фонових служб та можливих мережевих процесів оптимальним є обсяг у 16 ГБ, що дозволяє уникати непередбачених зависань та нестачі ресурсів у пікові моменти навантаження [20].

Мережеве з’єднання повинно забезпечувати стабільну і достатньо широку смугу пропускання, особливо у випадку використання безпровідної передачі. Wi-Fi-адаптер має підтримувати принаймні стандарт Wi-Fi 5 (802.11ac), що забезпечує швидкість, достатню для стрімінгу відео з низькою затримкою, хоча для максимальної стабільності рекомендується пряме USB-з’єднання через кабель типу USB-A на USB-C або Type-C на Type-C, залежно від підтримки смартфоном. Програмне забезпечення повинно запускатись на операційній системі не нижче Windows 10 або 11, хоча існують також версії Trinus VR, сумісні з Linux, однак у поточній реалізації використовується саме Windows 10. Драйвери відеокарти мають бути оновлені до останніх версій для коректної роботи з OpenGL і DirectX, оскільки більшість VR-додатків побудовані саме на цих графічних API [20, 22].

Щодо програмного середовища, то в ролі VR-додатків можуть виступати такі платформи, як SteamVR, Mozilla Hubs, VRChat, BigScreen BETA сцени на базі Unreal Engine чи Unity, які дозволяють реалізовувати як інтерактивні зустрічі, так і візуалізацію тривимірних середовищ для навчання або демонстрації. SteamVR у цьому випадку є найпростішим і найпоширенішим варіантом, сумісним з Trinus VR, і дозволяє швидко протестувати систему. Усі вищезазначені апаратні і програмні параметри у комплексі визначають можливість запуску та стабільної роботи VR-системи, і навіть мінімальне відхилення від них може суттєво погіршити досвід користування. Саме тому важливо не лише дотримуватись заявлених характеристик, а й розуміти взаємозв’язок між усіма компонентами, адже тільки за умов правильної конфігурації на кожному рівні можливо досягти повноцінного ефекту занурення у віртуальне середовище навіть без використання дорогого професійного обладнання.

Важливість параметрів дисплея смартфона. Оскільки смартфон у VR-системі виступає клієнтським пристроєм, відповідальним за відображення стереопари зображень для кожного ока, якість фінального візуального досвіду значною мірою визначається параметрами його дисплея, адже саме дисплей, а не процесор або інші внутрішні компоненти, стає критичним елементом для комфорту користувача та глибини занурення у віртуальне середовище. Незважаючи на те, що базові вимоги до мобільного процесора, як-от наявність чипа не нижче серії Snapdragon 800, також важливі, однак вони значною мірою стосуються лише базової сумісності, тоді як візуальна якість залежить саме від дисплея. Якщо роздільна здатність екрана є недостатньою, сприйняття зображення через VR-гарнітуру значно погіршується, адже враховуючи принцип стереопари, зображення для кожного ока відображається лише на половині дисплея, і ефективна щільність пікселів зменшується. До цього додається також і спотворення зображення, що зумовлюється конструкцією оптики гарнітури, тому чим вища реальна роздільна здатність дисплея, тим кращий результат. Бажано, щоб дисплей мав щонайменше Full HD (1920x1080), а ще краще — 2K або вище, що дозволяє мінімізувати ефект сітки, або "screen-door effect", який особливо часто виникає на недорогих смартфонах і може викликати розчарування при першому досвіді використання VR (див. рис. 2.5) [21].

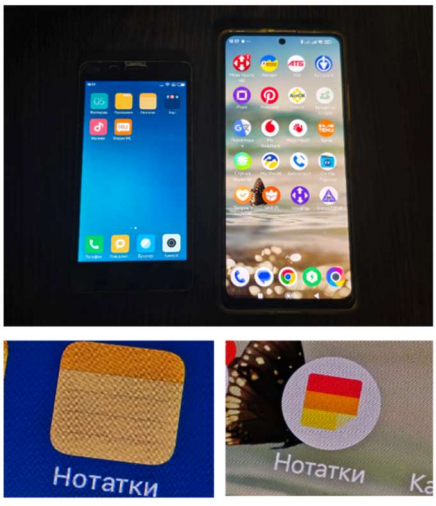


Рисунок 2.5 – Різниця якості дисплея смартфона через покоління: Poco X5 Pro (2023 року) проти Xiaomi Redmi 2 (2014 року)

Крім роздільної здатності, частота оновлення дисплея також суттєво впливає на загальну плавність зображення. Стандартні 60 Гц є базовим рівнем, однак для комфортного і тривалого користування VR-контентом перевага надається екранам з частотою 90 Гц і більше. Багато сучасних смартфонів вже підтримують 90 Гц, 120 Гц або навіть вищі значення, тому в умовах доступності подібних моделей питання частоти оновлення поступово втрачає критичність. Водночас тип матриці також має значення: IPS та OLED забезпечують вищу якість зображення, кращу передачу кольору, вищу контрастність та менший час відгуку, що позитивно впливає на занурення у VR. Ці типи дисплеїв широко поширені, і тому їх вибір не створює труднощів. Додатковим фактором залишається розмір дисплея — VR-гарнітури зазвичай підтримують діагоналі від 4,7 до 6 дюймів, і хоча більші пристрої можуть трохи виходити за межі корпусу гарнітури, їх можна налаштувати програмно, наприклад, через Trinus VR, скоригувавши розміри відображуваного зображення, що дозволяє зберегти сумісність навіть із більшими смартфонами [21].

Продуктивність передачі даних – USB проти Wi-Fi. Окремо увагу необхідно звернути на спосіб передачі VR-контенту від комп’ютера до смартфона, що може здійснюватися через USB-з’єднання або Wi-Fi. Обидва ці методи мають свої особливості та впливають на якість і стабільність зображення. Використання Wi-Fi забезпечує високу мобільність користувача, оскільки відсутні будь-які провода, що особливо зручно для демонстрацій або тимчасових VR-сесій, а також спрощує налаштування, особливо у випадку з ноутбуками або мобільними системами. При цьому, однак, безпровідний канал схильний до затримок (зазвичай 50–100 мс), які можуть створювати помітний дискомфорт під час тривалого використання, а також залежить від стабільності мережі, що може спричиняти артефакти, втрату кадрів і інші спотворення. Wi-Fi 5 або вище (802.11ac або 802.11ax) значно покращує ситуацію, однак повністю позбутися проблем із латентністю за безпровідного з’єднання наразі складно [22].

У свою чергу, провідне USB-з’єднання забезпечує стабільну передачу даних із затримкою менше ніж 30 мс, що робить його оптимальним варіантом для повноцінного VR-досвіду, зокрема у випадках тривалого використання, ігрових

сесій або професійних застосувань. Серед додаткових переваг — відсутність втрати кадрів, артефактів, а також менше навантаження на модуль безпровідного зв'язку. Зворотною стороною такого варіанту є обмеження мобільності користувача, адже кабель фізично обмежує переміщення, хоча у випадку стаціонарного використання або роботи за столом це не є суттєвою проблемою. Також для USB-з'єднання може знадобитися налаштування драйверів (наприклад, ADB-драйверів), однак цей процес є доволі простим і виконується одноразово.

У підсумку вибір між Wi-Fi і USB залежить від сценарію використання: для короткотривалих демонстрацій і тестування мобільність Wi-Fi цілком достатня, тоді як для стабільної, якісної роботи з мінімальними затримками бажано обрати провідне з'єднання, яке у випадку VR-технологій, навіть із використанням недорогих рішень, може суттєво підвищити рівень взаємодії та ефективність віртуального занурення [22].

Споживання ресурсів смартфоном при виведенні VR-потоку. Хоча смартфон у цій архітектурі виконує роль клієнта, його значення не обмежується лише функцією виведення зображення на дисплей, адже ресурси пристрою активно задіяні у всьому процесі, тому навіть попри стрімкий розвиток технологій і постійне зростання вимог до мобільних пристроїв, увагу слід приділяти характеристикам самого смартфона, що впливають на ефективність декодування VR-потоку. Центральний процесор виконує завдання реального часу, розкодовуючи відео, що надходить із ПК, і для забезпечення плавної роботи такого потоку потрібен принаймні чотирьохядерний процесор, як-от Snapdragon 660 (по офіційній документації рекомендована 800-серія) або новіші моделі, що сьогодні входять до складу багатьох смартфонів середньої цінової категорії. Графічний процесор, у свою чергу, відповідає за такі процеси як обробка зображення, масштабування, корекція викривлень та відображення лінз, і хоча моделі GPU бувають різні — Adreno, Mali, PowerVR — загальна вимога полягає в тому, щоб графічна підсистема не відставала у своїй продуктивності від центрального процесора, адже це безпосередньо впливає на якість відтворення VR-середовища [23].

Оперативна пам’ять у такому сценарії також має значення, оскільки клієнтська частина Trinus VR використовує приблизно 500–700 МБ оперативної пам’яті, залежно від якості потоку, і хоча сьогодні це не створює серйозних обмежень, оскільки більшість сучасних смартфонів мають значно більший обсяг пам’яті, недооцінювати цей параметр не варто. Усе це створює певне навантаження на акумулятор смартфона, який, працюючи в умовах постійного декодування та зчитування сенсорних даних, може втрачати до 20–30% заряду щогодини, що робить доцільним використання зовнішніх джерел живлення на кшталт повербанків, особливо під час тривалих VR-сесій. Також важливо розуміти, що інтенсивне використання апаратних ресурсів призводить до нагрівання пристрою, і тривала експлуатація в такому режимі може спричинити тепловий тротлінг — автоматичне зниження продуктивності для уникнення перегріву, що у свою чергу може викликати не лише зниження якості зображення, а й аварійне завершення роботи додатку або перезавантаження смартфона (див. рис. 2.6) [23].

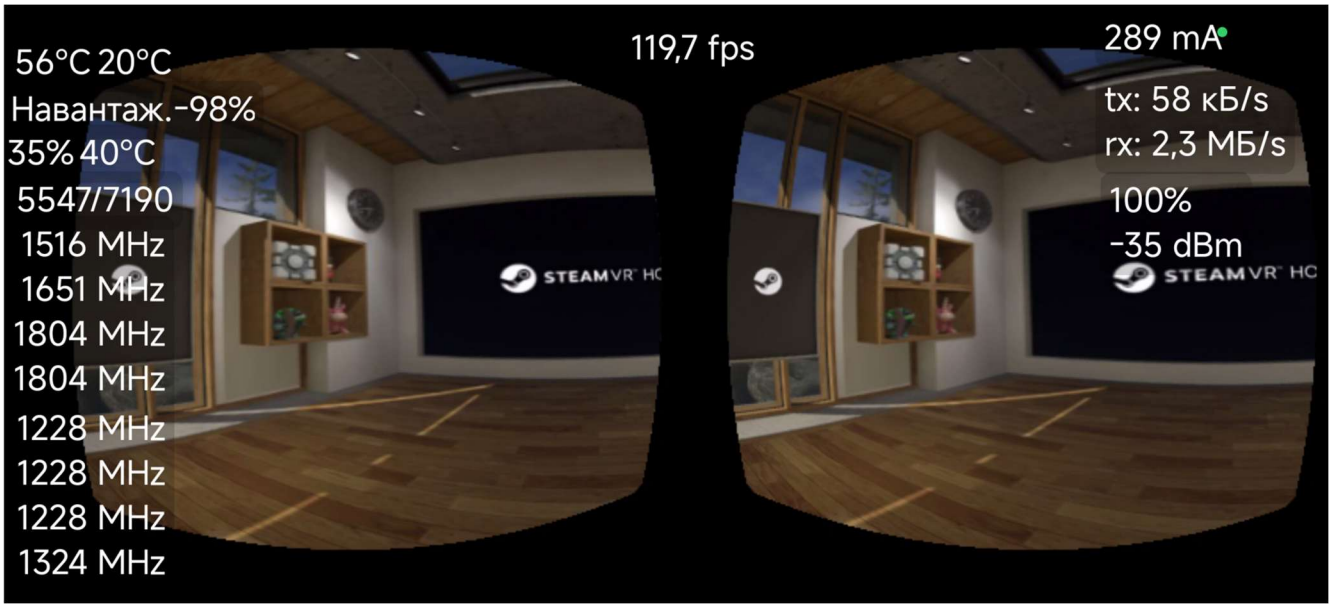


Рисунок 2.6 – Використання ресурсів смартфона при виведенні VR-контенту

Тому важливо організовувати перерви між VR-сесіями, дозволяючи пристрою охолонути, особливо в теплу пору року, коли природне тепловідведення утруднене. Один зі способів зниження температурного навантаження —

використання гарнітур із вентиляційними отворами або навіть простими пасивними системами охолодження, що дозволяє зменшити ризики перегріву і втрати стабільності роботи системи. З технічної точки зору бажано обирати енергоефективні смартфони середнього або високого класу, випущені не раніше 2020 року, які мають кращу підтримку сучасних стандартів передачі даних, енергоощадні процесори та оптимізовані графічні модулі. При цьому зниження навантаження на систему можливе також шляхом встановлення в налаштуваннях Trinus VR середнього рівня якості потоку — на баланс між якістю зображення та продуктивністю, що забезпечить стабільну роботу системи навіть у менш потужних конфігураціях.

Таблиця 2.3 – Основні технічні вимоги та параметри системи VR-взаємодії з Trinus VR

Компонент	**Мінімальні вимоги / Рекомендації**	**Примітки**
Сервер (ПК)	Intel Core i5 (6gen+) або Ryzen 5, 4 ядра, багатопоточність	CPU – логіка, стискання, координати
	Відеокарта: GTX 1050 Ti / RX 570 (мін), GTX 1660 / RTX 2060 (реком.)	GPU – рендеринг, стабільність fps
	RAM: 8 ГБ (мін), 16 ГБ (оптимально)	Запуск VR-додатку, Trinus, фонові процеси
	ОС: Windows 10 або 11	Trinus також сумісний з Linux
	Мережа: Wi-Fi 5 (802.11ac) / USB-з’єднання	USB – нижча латентність (<30 мс), стабільність

Продовження таблиці 2.3 – Основні технічні вимоги та параметри системи VR-взаємодії з Trinus VR

Компонент	**Мінімальні вимоги / Рекомендації**	**Примітки**
Смартфон (клієнт)	Процесор: Snapdragon 660 (мін), 800-серія (реком.)	Декодування потоку в реальному часі
	Графіка: Adreno / Mali / PowerVR (середнього рівня і вище)	Масштабування, корекція, плавність
	RAM: ≥2 ГБ	Використання Trinus (500–700 МБ)
	Дисплей: ≥1920x1080 (мін), ≥2K (реком.), 90–120 Гц, OLED/IPS	Якість візуального досвіду, уникнення "screen-door effect"
	Акумулятор: зовнішнє живлення бажане	Витрата до 30%/год, можливе перегрівання
З’єднання	Wi-Fi 5 / USB (Type-C / A)	USB – нижча латентність, Wi-Fi – мобільність
VR-додатки	SteamVR, BigScreen BETA, VRChat	Сумісність з Trinus VR
Додатково	Вентиляція гарнітури, перерви під час роботи	Для уникнення теплового тротлінгу

У підсумку (див. табл. 2.3) реалізація повноцінного VR-середовища на основі ПК і смартфона вимагає не лише потужного серверного компонента у вигляді ПК з сучасною відеокартою та процесором, але й оптимально підібраного клієнтського пристрою, здатного забезпечити якісний дисплей, ефективне охолодження, прийнятну енергоефективність та здатність до стабільної обробки відеопотоку. Водночас важливо не забувати про якість мережевого з’єднання, яка визначає стабільність та затримку передачі зображення, і всі ці компоненти в сукупності

здатні забезпечити повноцінний користувацький досвід навіть на доступних за ціною конфігураціях, за умови правильного налаштування та оптимізації всіх ланок системи [21-23].

2.3 Функціональні сценарії застосування VR у процесі дистанційної роботи

Віртуальна реальність відкриває нові горизонти для організації дистанційної праці, забезпечуючи імітацію фізичної присутності в єдиному цифровому просторі незалежно від фактичного розташування учасників, що дозволяє формувати віртуальні офіси, проводити зустрічі, презентації, а також співпрацювати над документами чи тривимірними моделями в режимі реального часу. Ці функціональні можливості особливо яскраво проявляються на прикладі інтеграції доступних архітектур на кшталт Trinus VR, де серверну частину виконує ПК, а роль клієнта бере на себе смартфон, вставлений у недорогу VR-гарнітуру, що забезпечує простоту впровадження технології без надмірних витрат [22, 24-25, 32].

Типові сценарії VR-взаємодії – зустрічі, презентації, спільне редагування. Типовими сценаріями використання VR у професійному середовищі виступають віртуальні наради, презентації та спільне редагування контенту. Створення умов для таких робочих взаємодій дозволяє компенсувати відсутність фізичної присутності, властиву дистанційній роботі, за рахунок ефекту присутності, що виникає під час повного занурення у віртуальне середовище. Наприклад, під час віртуальних зустрічей учасники з’являються у вигляді аватарів, які знаходяться у спільному віртуальному просторі, такому як переговорна кімната, де кожен може бачити позицію інших, чути їх завдяки об’ємному звуку з ефектом локалізації джерела мовлення та навіть спостерігати жестикуляцію, що посилює ефект природного спілкування. У випадку презентацій один із учасників демонструє матеріали — слайди, відео або тривимірні об’єкти — водночас інші можуть

взаємодіяти з цим контентом за допомогою інструментів на кшталт лазерної указки, віртуальної маркерної дошки або анотаційних засобів, що робить процес презентації динамічнішим та інтерактивнішим (див. рис. 2.7) [24, 32].

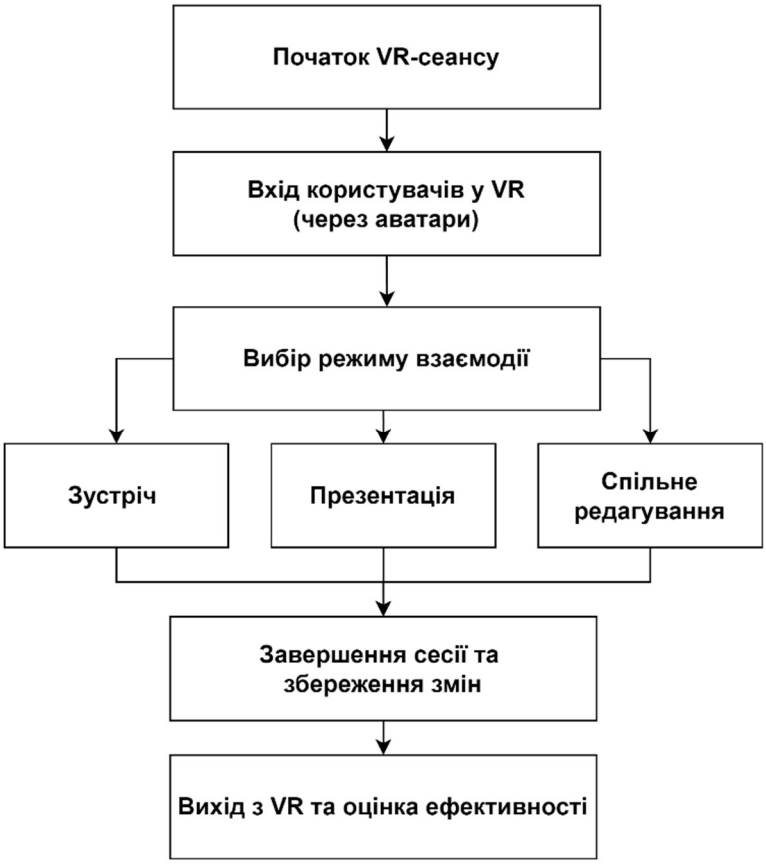


Рисунок 2.7 – Типовий VR-сценарій: віртуальна зустріч

Особливу цінність становить сценарій спільної роботи над файлами, де VR-платформи з інтеграцією документів через хмарні сервіси або синхронізацію з ПК дозволяють кільком учасникам у реальному часі відкривати, переглядати, змінювати документи і паралельно обговорювати ці зміни голосом або через текстовий чат, зберігаючи ефект присутності (див. рис. 2.8).

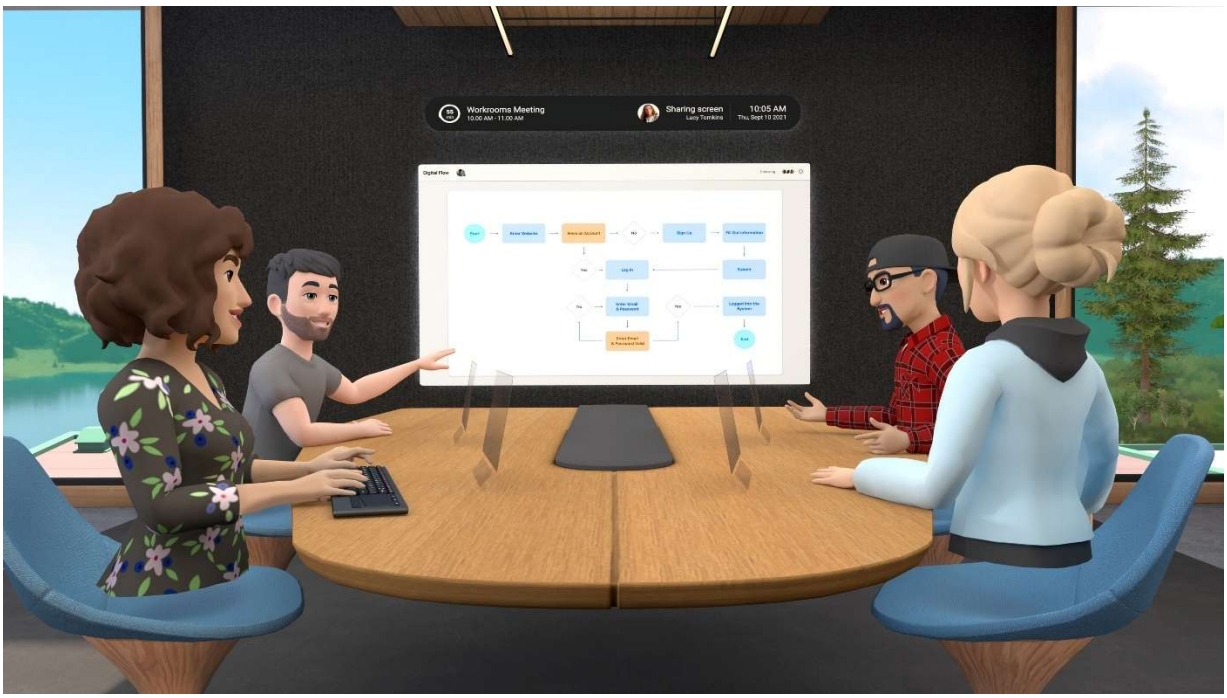


Рисунок 2.8 – Візуалізація спільної роботи в VR:
Horizon Workrooms (від Meta)

Така віртуальна взаємодія дає змогу гнучко моделювати реальні офісні ролі, зокрема, коли доповідач розміщується у центрі віртуального простору, а слухачі організовано розміщені довкола, що забезпечує природне відчуття простору і посилює ефективність спілкування. Крім того, така структура сприяє формуванню неформальної атмосфери, що позитивно впливає на командну динаміку та загальну комунікацію між учасниками [24, 32].

Віртуальний офіс як середовище постійної присутності. Концепція віртуального офісу передбачає створення постійно доступного цифрового середовища, у якому учасники команди можуть перебувати протягом робочого дня подібно до фізичного офісу, дозволяючи легко звертатися до колег з поточними питаннями без необхідності організації окремих відеозустрічей. Такий підхід спрощує проведення спонтанних обговорень, коротких мітингів і швидкої координації дій без перемикання між різними платформами. Присутність у VR може бути частковою чи періодичною, із чергуванням із реальним світом задля уникнення когнітивного навантаження або візуального дискомфорту, однак навіть

фрагментарна участь створює враження спільного робочого простору (див. рис. 2.9) [24, 32].

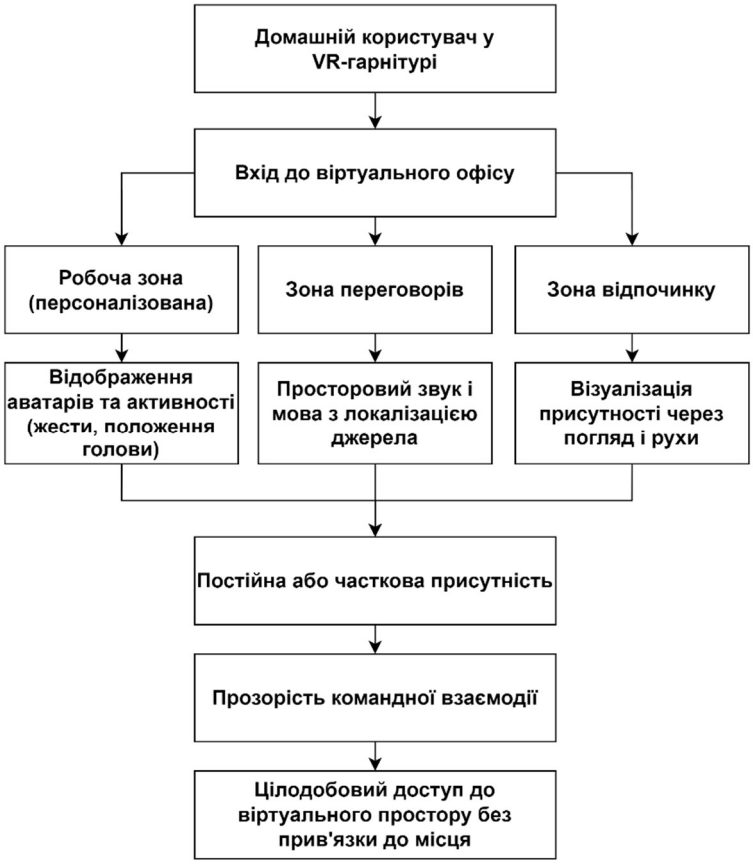


Рисунок 2.9 – Топологія VR-взаємодії у домашньому середовищі

У реалізації такого простору створюється структура з віртуальними кімнатами — робочими зонами, зонами переговорів, відпочинку, що імітують реальний офіс із віртуальними столами, де відображаються персоналізовані об’єкти: ноутбуки, документи, інструменти взаємодії. Завдяки трекінгу положення голови або жестів через смартфон, інші учасники можуть бачити напрямок погляду або активність колеги, що функціонує як аналог зорового контакту у фізичному середовищі. Такий рівень візуалізації дозволяє зменшити відчуття ізольованості, підвищити прозорість взаємодії всередині команди та зробити загальну динаміку роботи у віддаленому форматі більш зрозумілою і координованою, що також сприяє покращенню психологічного стану учасників та зміцненню командної згуртованості, що особливо важливо у розподілених робочих процесах, де відсутня

фізична взаємодія. Загальна ідея полягає у створенні такого цифрового середовища, яке дозволяє уникнути витрат часу на поїздки, зберігаючи при цьому ефективність та природність взаємодії в команді, де доступ до спільного простору забезпечується у будь-який момент, без прив'язки до конкретного місця.

Використання Trinus VR як приклад бюджетного рішення. Використання програмного забезпечення Trinus VR відкриває можливість передавати VR-контент із комп'ютера на смартфон, який виступає дисплеєм у складі мобільної VR-гарнітури, завдяки чому значно знижуються фінансові бар'єри для входу у віртуальні середовища за рахунок використання наявних у користувача пристроїв, і саме це дозволяє починати впровадження відповідних технологій з мінімальними витратами, що є критично важливим при популяризації VR у широких масах. Хоча професійні пристрої на кшталт Meta Quest 2 або Meta Quest 3 демонструють кращі технічні характеристики, базові ефекти занурення все ж досягаються і за допомогою бюджетного рішення, що особливо актуально в умовах дистанційної праці. Однією з основних переваг Trinus VR є можливість використання персонального комп'ютера як джерела VR-контенту, що дозволяє запускати повноцінні VR-додатки, наприклад ті, які створені для більш потужних гарнітур, навіть на недорогих пристроях, при цьому сам смартфон виконує роль дисплея, забезпечуючи значну економію порівняно з дорогими альтернативами на ринку, хоча при цьому слід враховувати обмеження, пов'язані з роздільною здатністю екранів смартфонів та відсутністю трекінгу рук [25].

Система Trinus VR забезпечує гнучке налаштування, включаючи підтримку як USB-з'єднання, так і безпровідного передавання сигналу через Wi-Fi, а також дозволяє змінювати якість відео та частоту кадрів відповідно до потужності обладнання. На серверній частині, яка розміщується на ПК, доступні функції, що дозволяють емуляцію руху голови завдяки вбудованим акселерометрам смартфона, що суттєво підсилює ефект присутності та загальне занурення у віртуальне середовище. Прикладом практичного застосування може бути демонстрація VR-презентації через Mozilla Hubs або перебування у VR-приміщенні з використанням гарнітури на основі смартфона типу Esperanza VR, що вже дозволяє повноцінно

інтегрувати віртуальні простори з реальними каналами комунікації, зокрема Discord, Zoom тощо. Обмеження такої архітектури включають відсутність контролерів, а отже неможливість трекінгу рук, нижчу якість зображення на старіших пристроях та підвищене енергоспоживання, яке потребує підключення до зовнішнього джерела живлення під час тривалих сесій, хоча такі рішення використовуються і в дорожчих гарнітурах, де автономність також є обмеженою (див. рис. 2.10) [22, 25].



Рисунок 2.10 – Приклад віртуального локального офісу з Trinus VR: BigScreen BETA (на базі SteamVR)

Вимоги до VR-сценаріїв у типових умовах роботи з дому. Для ефективної роботи VR-сценаріїв у домашніх умовах середовище має відповідати певним критеріям, які роблять його придатним для масового впровадження. Насамперед, ідеться про мінімальні апаратні вимоги, серед яких – персональний комп’ютер середнього рівня, здатний обробляти VR-контент, смартфон з роздільною здатністю Full HD або вище (оптимально 2.5K) із підтримкою Wi-Fi 5 або з’єднанням через USB, а також доступна гарнітура на зразок Google Cardboard або Esperanza VR. Окрім цього, необхідною є простота налаштування, тобто низький

поріг входження, коли користувач може самостійно встановити Trinus VR Server на ПК та клієнтське додаток на смартфон без потреби у додатковому програмуванні, що особливо цінно в контексті непрофесійного використання. Простий інтерфейс дозволяє орієнтуватися навіть тим, хто не має технічного бекграунду, що розширює коло потенційних користувачів.

Не менш важливою вимогою є ергономіка – тривалі VR-сесії не мають викликати перевтому, а простір повинен бути організований так, щоб навігація, інтерфейси, об’єкти та точки фокусування були розміщені логічно й інтуїтивно зрозуміло, а також не вимагали зайвих зусиль для взаємодії. Гнучкість сценаріїв також визначається здатністю масштабування: віртуальне середовище повинно підтримувати як роботу вдвох, так і участь десятків людей одночасно, дозволяти гібридну взаємодію, коли частина учасників перебуває у VR, а інші – у звичайному браузері, що робить VR-інтеграцію сумісною з уже існуючими форматами комунікації без створення інформаційного бар’єру.

У підсумку, впровадження VR у сферу дистанційної роботи, зокрема з використанням рішень на базі Trinus VR, демонструє значний потенціал для покращення командної взаємодії, підвищення якості спілкування та створення ефекту спільної присутності, що дозволяє відчутно скоротити дистанцію між учасниками, не виходячи з дому. Технології, які донедавна залишалися недосяжними через свою вартість, тепер можуть бути реалізовані за допомогою простих інструментів, де поєднання програмного забезпечення, ПК та смартфона дозволяє створити повноцінне робоче середовище із можливістю проведення зустрічей, презентацій та спільної праці, при цьому зменшуючи залежність від традиційних відеоконференцій, розширюючи межі цифрової співпраці та підвищуючи загальну ефективність віддаленої командної взаємодії.

2.4 Алгоритмічне забезпечення налаштування та запуску системи VR-візуалізації

Сама технологія віртуальної реальності вимагає точного налаштування як апаратних, так і програмних компонентів, що стає особливо актуальним у випадках застосування бюджетних рішень, які не мають повноцінної інтеграції «з коробки» і потребують ручного конфігурування. Одним із таких доступних інструментів, що дозволяє реалізувати VR-візуалізацію на базі вже наявних пристроїв, є Trinus VR — програмне забезпечення, яке забезпечує трансляцію VR-зображення з комп'ютера на смартфон, що виступає у ролі дисплея в мобільній VR-гарнітурі. Щоб використати це рішення в умовах домашнього або офісного середовища, необхідно зрозуміти послідовність інсталяції, налаштування та оптимізації системи, яка дозволяє швидко розгорнути VR-сценарій без необхідності дорогого обладнання чи складної інфраструктури [22, 26].

Покрокова інсталяція Trinus VR на ПК та смартфон. Алгоритм інсталяції Trinus VR охоплює дві основні частини встановлення:

— серверної частини на ПК (Trinus VR Server);

— клієнтської на смартфон (Trinus VR Client).

На першому етапі необхідно перейти на офіційний сайт розробника Trinus VR і завантажити інсталятор Trinus VR Server для операційної системи Windows. Після завантаження програма потребує стандартної інсталяції з підтвердженням прав адміністратора. У деяких випадках може бути необхідно додати дозвіл у брандмауері Windows для вхідних з'єднань, однак зазвичай система працює без додаткових втручань. Завершення цього етапу забезпечує готовність ПК до взаємодії з VR-клієнтом на смартфоні (див. рис. 2.11) [22, 26].

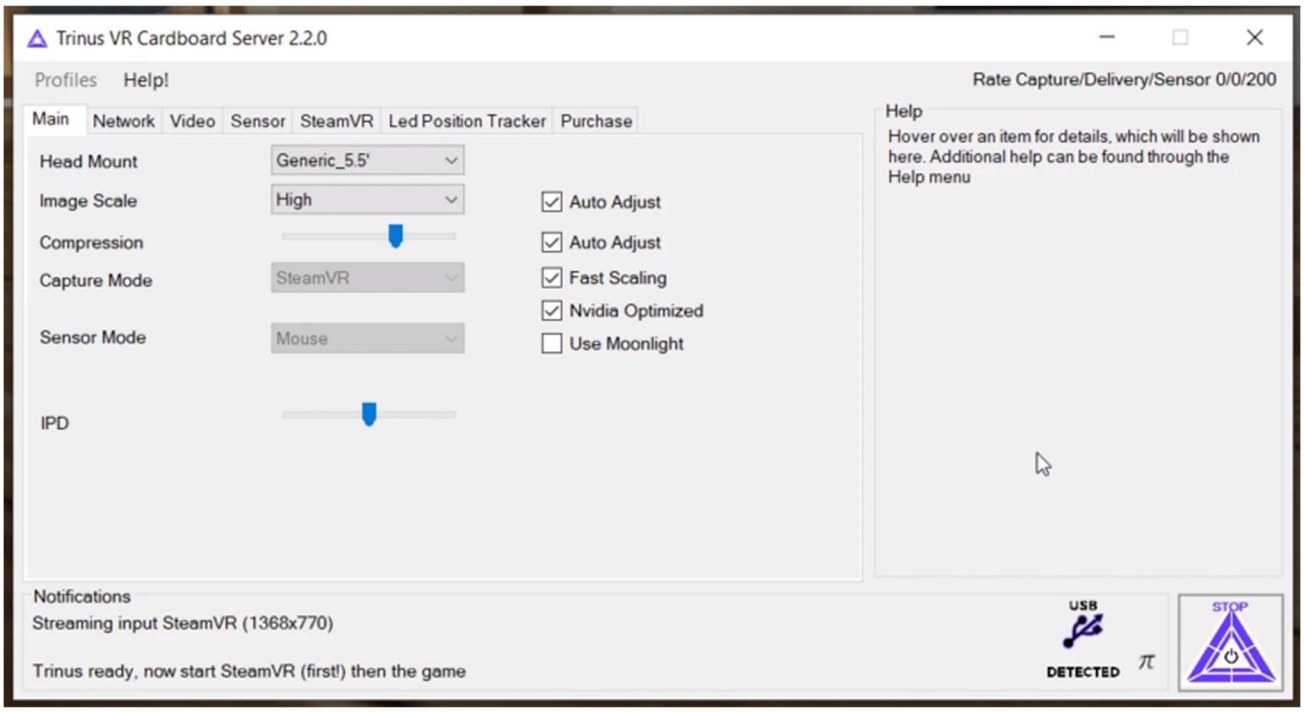


Рисунок 2.11 – Інтерфейс Trinus VR Server на ПК

Наступним кроком є встановлення клієнтської частини на мобільний пристрій. Trinus VR Client можна завантажити безпосередньо з сайту у форматі APK (через Google Play вже недоступно). Після першого запуску додаток потребує дозволів на доступ до сенсорів, мережі та енергоспоживання, що необхідно для коректної роботи функцій відстеження рухів та виводу зображення. Підключення смартфона до ПК може здійснюватися як через спільну Wi-Fi мережу, так і за допомогою USB-з’єднання, яке забезпечує стабільнішу передачу даних та нижчу затримку (див. рис. 2.12) [22, 26].

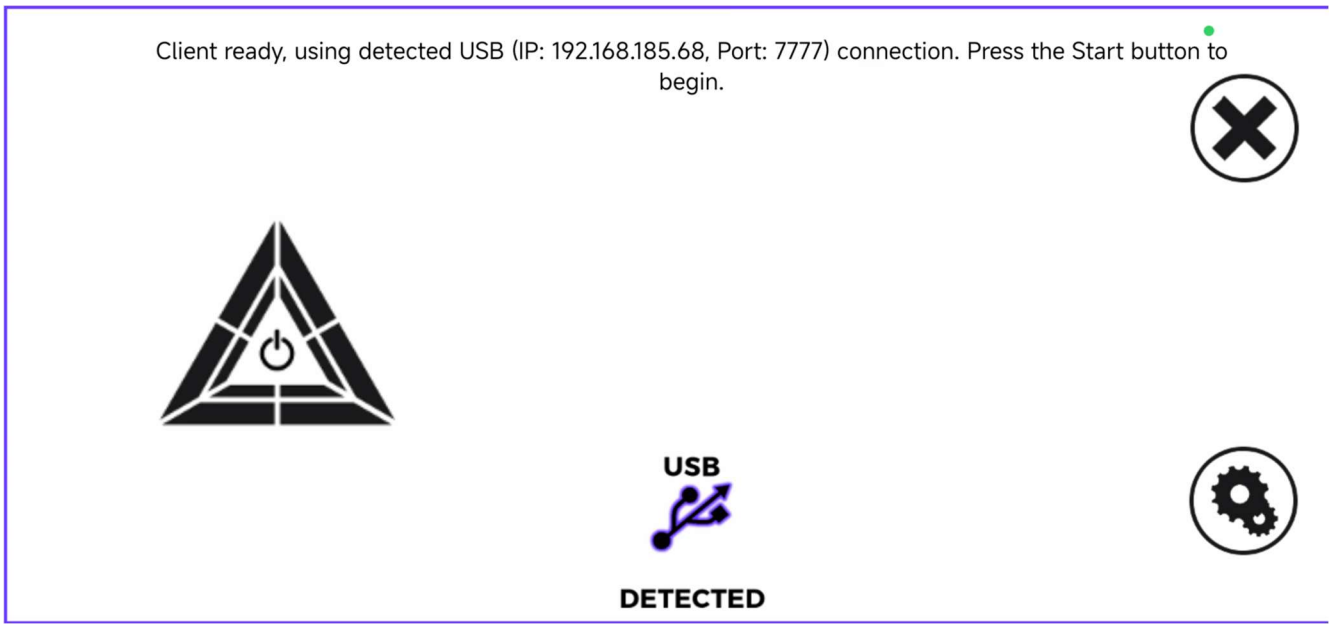


Рисунок 2.12 – Інтерфейс Trinus VR Client на Android

Програмне забезпечення сумісне з більшістю бюджетних VR-гарнітур для смартфонів, включно з моделями Google Cardboard, BoboVR, VR Box та подібними, у тому числі гарнітурою Esperanza VR, яка використовується як приклад у практичному сценарії. Для коректної роботи потрібна мінімальна версія Android 5 або новіша, а також Windows 7 або вище з розрядністю не менше 64-біт. Такі вимоги не є надмірними і цілком відповідають технічним можливостям більшості сучасних пристроїв, що дозволяє впроваджувати систему навіть на застарілих апаратах, якщо вони підтримують базову функціональність.

Налаштування системи VR-візуалізації на базі Trinus VR не потребує специфічних знань або додаткового обладнання, даючи змогу за короткий час реалізувати віртуальне середовище, яке може використовуватись як для демонстрацій, так і для повноцінної командної співпраці у віддаленому форматі, при цьому залишаючись максимально доступним у фінансовому плані.

Алгоритм налаштування з'єднання (через USB або Wi-Fi). З'єднання між комп'ютером і смартфоном у системі Trinus VR може здійснюватися двома основними способами — через безпровідну мережу Wi-Fi або через провідне з'єднання за допомогою USB-кабелю, при цьому кожен варіант має власні особливості, що впливають на стабільність, швидкість передачі даних і зручність

користування. У разі вибору Wi-Fi-з’єднання важливо перш за все переконатися, що і комп’ютер, на якому запущений сервер Trinus VR, і смартфон, що виконує функції VR-дисплея, знаходяться в одній локальній мережі, причому ПК може бути з’єднаний із маршрутизатором за допомогою кабелю, але обидва пристрої мають мати доступ до одного й того самого маршрутизатора для забезпечення синхронної роботи. Після цього необхідно запустити Trinus VR Server на комп’ютері, потім запустити мобільний клієнт на смартфоні, обрати тип з’єднання Wi-Fi, активувати його натисканням кнопки «Start» на обох пристроях і дочекатися автоматичного встановлення зв’язку, яке зазвичай займає кілька секунд (див. рис. 2.13-2.14).

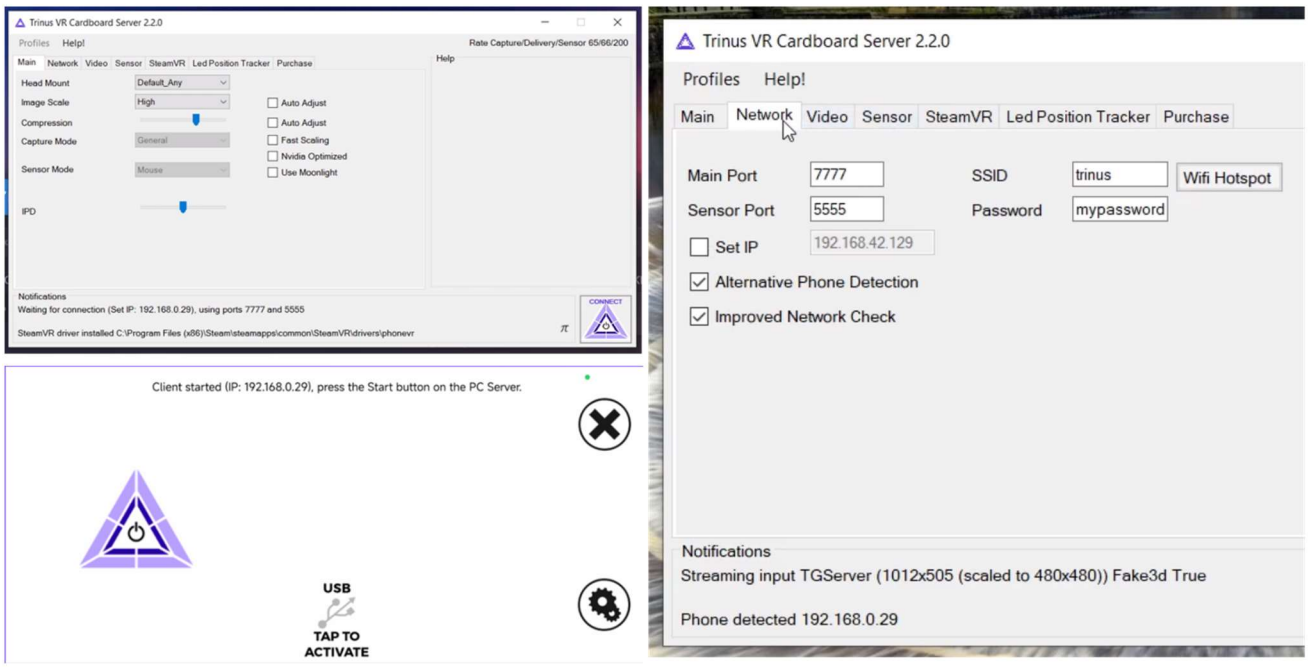


Рисунок 2.13 – Процес налаштування Wi-Fi-з’єднання

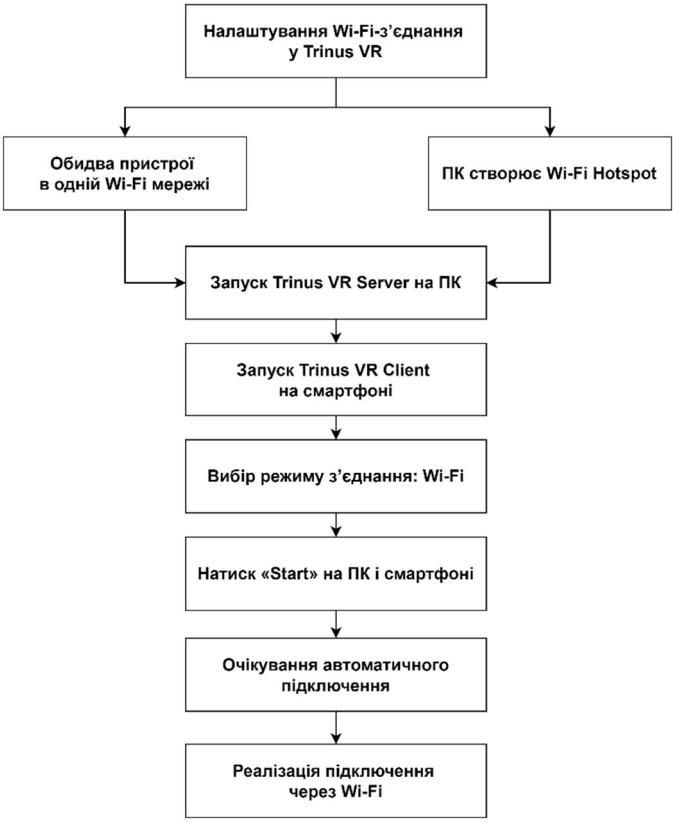


Рисунок 2.14 – Алгоритм налаштування Wi-Fi-з'єднання

Перевага цього способу полягає у простоті реалізації, оскільки не потребуються додаткові кабелі, однак недоліками можуть бути вища затримка в передаваному зображенні, особливо в перевантажених мережах, а також можливі проблеми з мережевими портами, які іноді доводиться змінювати вручну в налаштуваннях на клієнті та сервері [22, 26].

Якщо ж обирається USB-з'єднання, яке зазвичай забезпечує меншу затримку та стабільнішу якість передачі відеопотоку, тоді алгоритм налаштування потребує трохи більше дій, але кінцевий результат часто буває ефективнішим. Спочатку на смартфоні потрібно активувати режим налагодження через USB (Developer Mode), після чого під'єднати смартфон до ПК через USB-кабель та перевірити, чи встановлені необхідні драйвери ADB для коректного розпізнавання пристрою. Далі в Trinus VR Server на комп'ютері та клієнті на смартфоні обирається режим з'єднання USB, після чого ініціюється запуск і очікується автоматичне встановлення з'єднання. Такий варіант забезпечує помітно меншу затримку та кращу стабільність роботи, однак вимагає наявності якісного кабелю достатньої

довжини (рекомендовано понад два метри), адже смартфон підключається до стаціонарного ПК, який у свою чергу не є зручним для переміщення, що може створювати фізичні обмеження при використанні VR-гарнітури (див. рис. 2.15-2.16).

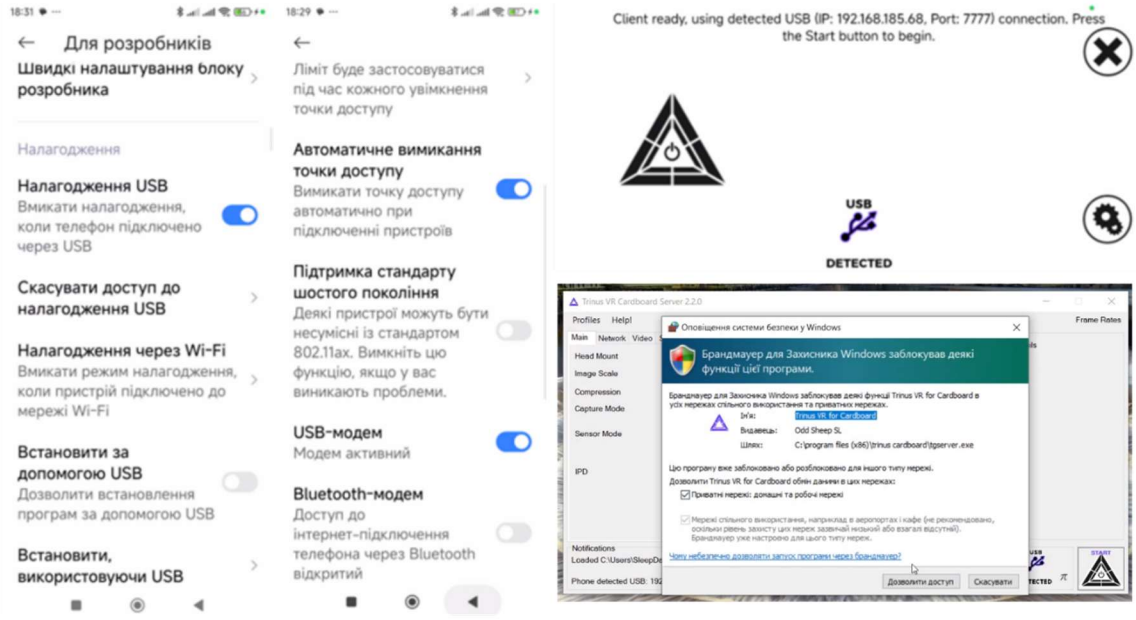


Рисунок 2.15 – Процес налаштування USB-з’єднання

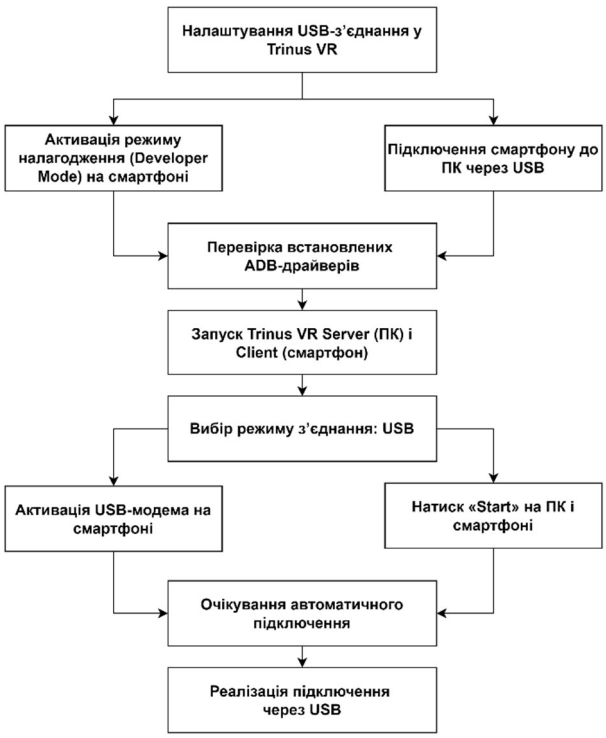


Рисунок 2.16 – Алгоритм налаштування USB-з’єднання

Перевірка працездатності та синхронізації системи. Після встановлення будь-якого з типів з’єднання необхідно переконатися, що система функціонує коректно, а саме — що зображення передається належним чином, а VR-сцена синхронізується між пристроями. Основними етапами перевірки працездатності є запуск VR-додатку або гри на ПК (наприклад, SteamVR), спостереження за відображенням на екрані смартфона, яке має бути чітко поділене на дві частини для кожної лінзи, і перевірка коректної роботи стереоскопічної картинки. У процесі верифікації також слід звернути увагу на роботу акселерометра, тобто перевірити відповідність рухів голови зміні зображення на екрані смартфона — це дозволяє оцінити, наскільки точно й без затримок система реагує на рух користувача. Додатково важливо переглянути показник FPS (кількість кадрів за секунду), який доступний у налаштуваннях Trinus VR, та за потреби відкоригувати його значення для забезпечення більш плавної роботи, а також за необхідності змінити параметри зображення, такі як роздільна здатність або кут огляду (див. рис. 2.17).

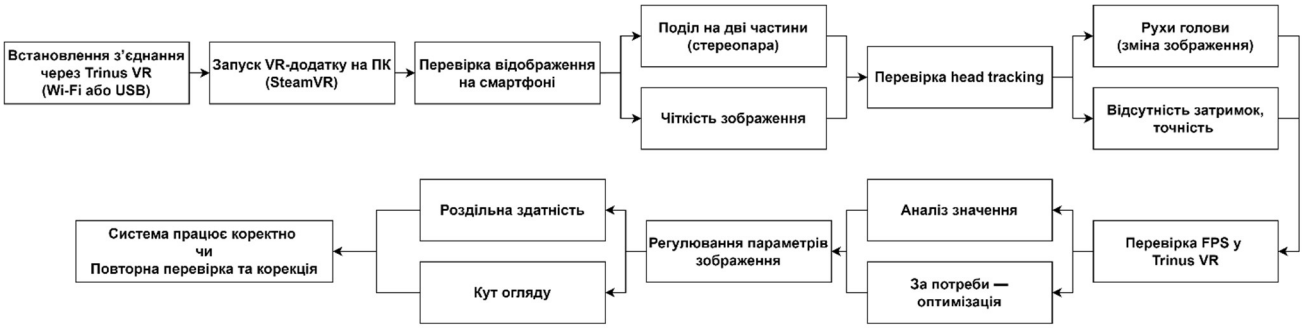


Рисунок 2.17 – Алгоритм перевірки працездатності системи

У процесі тестування можуть виникати типові проблеми, серед яких найпоширенішими є розсинхронізація рухів, тобто затримка в реакції на обертання голови, що може бути спричинено як перевантаженням пристрою, так і збоєм у роботі гіроскопа, однак часто подібну ситуацію можна усунути простим перезапуском як сервера, так і клієнта. Серед інших можливих проблем — відсутність зображення внаслідок некоректного з’єднання або нестабільної мережі, а також некоректне розташування смартфона у гарнітурі, яке спричиняє розмитість

або роздвоєння зображення, що істотно погіршує ефект занурення у віртуальне середовище. У деяких випадках неполадки виникають через недопрацювання самого додатка, який наразі ще перебуває у стані раннього доступу, і це також може впливати на стабільність та сумісність з різними моделями смартфонів. Іноді бувають труднощі із визначенням мережевого порту, який потрібно змінити вручну у налаштуваннях Trinus VR Server, хоча у більшості випадків система самостійно задає необхідні параметри, і втручання користувача не є обов'язковим [26].

У підсумку, алгоритмічна підготовка системи віртуальної реальності на базі Trinus VR (див. рис. 2.18-2.19) є цілком доступною навіть за обмежених ресурсів і без спеціалізованих технічних знань, при цьому правильний вибір способу з'єднання (Wi-Fi або USB), перевірка синхронізації, подальша оптимізація параметрів на обох пристроях і усвідомлення можливих проблем із їх оперативним вирішенням дозволяє створити функціональне VR-рішення без значних фінансових витрат, відкриваючи нові можливості для віддаленої командної взаємодії, освіти, проєктної роботи та інших форм цифрової колаборації.



Рисунок 2.18 – Екран смартфона під час роботи Trinus VR Client



Рисунок 2.19 – Екран ПК під час роботи Trinus VR Server

РОЗДІЛ 3 АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА, ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Шляхи підвищення ефективності використання віртуального середовища

Заснування використання технології віртуальної реальності в умовах дистанційної роботи потребує постійної уваги до якості зображення, стабільності з'єднання та фізичного комфорту користувача, і саме тому при зверненні до економічно доступних рішень, таких як Trinus VR, де зображення передається зі стаціонарного комп'ютера на смартфон, на перший план виходять параметри:

- графічного потоку;
- затримка сигналу;
- характеристики пристроїв;
- умови навколишнього середовища.

У таких випадках варто усвідомлювати, що подібна система не може забезпечити ідеальний результат без ретельного налаштування, і досягнення відчутного ефекту занурення у віртуальний простір напряму залежить від застосування ряду технічних рішень, спрямованих на оптимізацію якості та продуктивності. Інакше ефект занурення залишається лише умовним, а використання системи – малоефективним [27-28].

Оптимізація якості зображення при використанні Trinus VR. Одним із критично важливих аспектів підвищення ефективності такого середовища стає оптимізація якості зображення, зокрема у випадку Trinus VR, де візуальний потік формується на ПК, стискається і передається на смартфон, який через спеціальний інтерфейс розділяє зображення на стереоскопічну пару. Через стискання відеопотоку з метою зменшення затримки виникає характерний ефект розмитості

або пікселізації, що суттєво впливає на сприйняття і занурення, тому необхідно забезпечити правильний баланс між якістю картинки і швидкодією передавання. Одним із найперших кроків стає налаштування роздільної здатності – Trinus дозволяє вручну вказати параметри потоку, і найбільш рекомендованими розмірами є 1280×720 або 1600×900, що забезпечують достатню деталізацію при помірному навантаженні на графічний процесор. Додатково важливим є вибір формату кодування – застосування кодека H.264 або H.265 (при наявності відповідної підтримки з боку смартфона і відеокарти) дозволяє досягти ефективної компресії без значного погіршення зображення, тоді як застарілі MJPEG або інші прості формати викликають підвищене навантаження і помітну втрату чіткості. З огляду на це, типовим стандартом для потоку стає саме H.264 або H.265, хоча останній потребує більше обчислювальних ресурсів (див. рис. 3.1-3.2) [27].



Рисунок 3.1 – Метод покращення якості зображення в Trinus VR

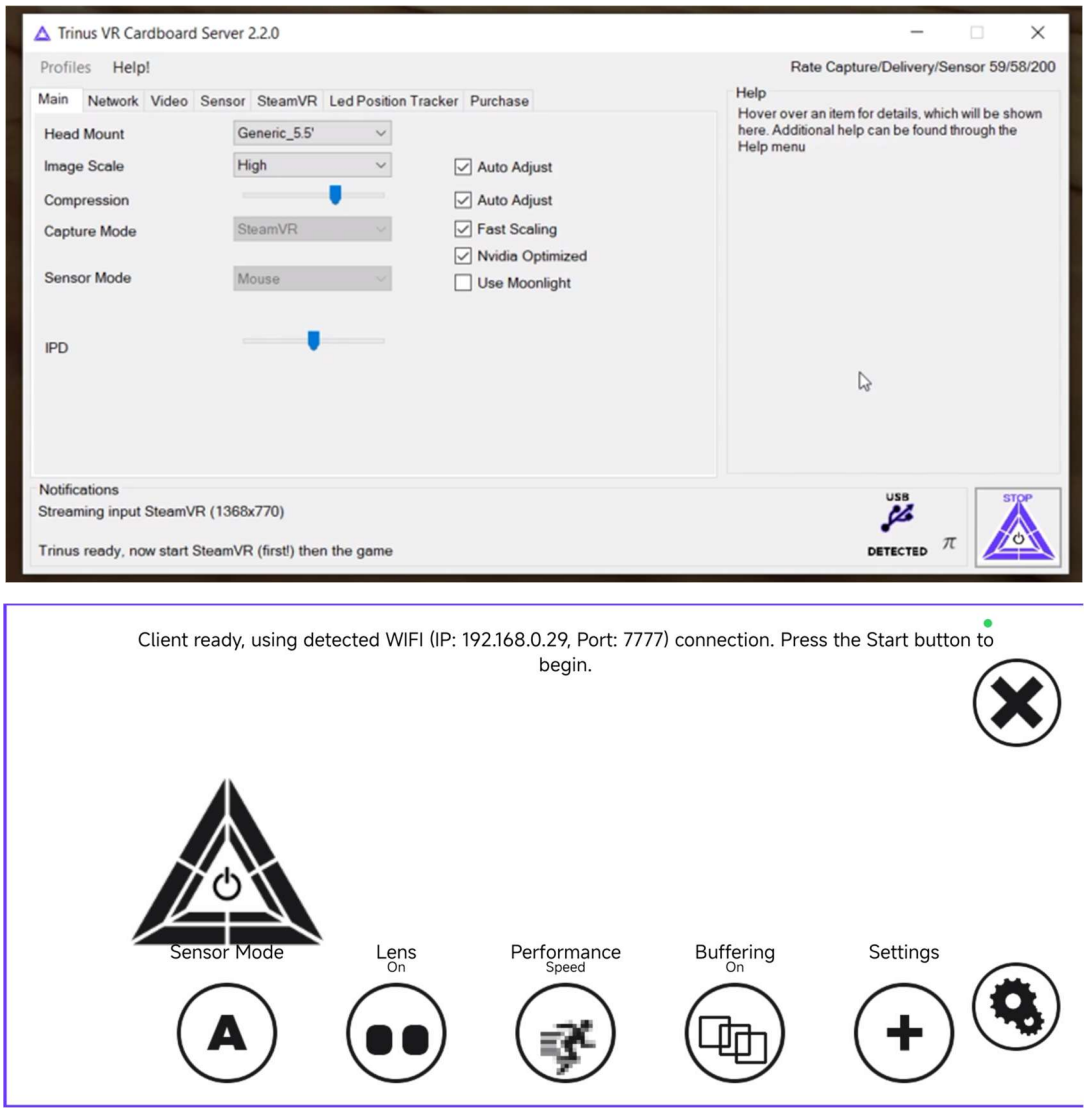


Рисунок 3.2 – Зміна налаштувань системи для покращення якості зображення в Trinus VR

Параметри поля зору (FOV) також мають суттєвий вплив на сприйняття VR-контенту, оскільки правильне налаштування дозволяє уникнути викривлень по краях та забезпечує більш природне сприйняття простору. Через поділ екрану на дві частини при використанні стереопари в Trinus VR важливо виставити співвідношення так, щоб воно відповідало фізіології користувача, зокрема міжзіничній відстані, а також відповідало фокусній відстані лінз у самій гарнітурі. Окрім цього, налаштування режиму масштабування (Crop або Fit) залежить від розміру та співвідношення сторін дисплея смартфона – вибір між обрізанням зі збереженням масштабу чи повним охопленням без обрізки також впливає на чіткість і комфорт перегляду. Всі ці кроки разом, виконані поступово й узгоджено,

дозволяють навіть на середньостатистичному обладнанні досягнути прийнятного рівня якості зображення без артефактів, спотворень, затримок і візуального дискомфорту, які могли б викликати нудоту, головний біль або втому.

Поряд із налаштуванням в межах самого Trinus VR важливо враховувати і технічну сторону налаштування комп'ютера, який слугує сервером. Насамперед слід оновити графічні драйвери до останньої версії для забезпечення максимальної сумісності та продуктивності, вимкнути вертикальну синхронізацію (V-Sync) і згладжування в іграх, що лише додають затримки, а також закрити всі фонові процеси, які можуть споживати ресурси або спричинити мікрозатримки під час передачі зображення. Сукупність цих дій дозволяє досягти цілісної оптимізації графічної складової системи Trinus VR, і таким чином забезпечити стабільне, плавне й наближене до повноцінного занурення відображення віртуального простору на базі економічного, проте функціонального технічного рішення [27].

Зменшення затримки сигналу та «деренчання» зображення. Зменшення затримки сигналу та уникнення «деренчання» зображення є одним із ключових технічних викликів при впровадженні VR-рішень на основі недорогих технологій, і одним із аспектів, що потребує підвищення ефективності у віртуальній реальності, виступає саме латентність — затримка між рухом голови та відображенням оновленого зображення. Навіть незначні затримки в межах 50–100 мілісекунд можуть спричинити дискомфорт, порушення сприйняття простору та повну втрату ефекту занурення, а також викликати неприємні фізіологічні реакції, що унеможливлює комфортне використання системи. Зменшити затримку можливо як на рівні апаратного забезпечення, так і шляхом оптимізації каналів передачі даних, і до основних методів зниження латентності належить перехід на провідне з'єднання через USB-кабель, що забезпечує стабільний пінг, більшу пропускну здатність і практично повну відсутність втрат пакетів порівняно з безпровідним з'єднанням. Якщо ж використання кабелю неможливе, доцільним є підключення до маршрутизатора, що підтримує діапазон 5 ГГц, оскільки цей частотний діапазон є менш перевантаженим та забезпечує вищу швидкість передавання. Крім того, до способів оптимізації також належить зменшення бітрейту потоку, особливо в

безпровідному режимі, де оптимальними значеннями вважаються 3–6 Мбіт/с, що дозволяє зменшити навантаження на мережу без істотного погіршення якості зображення (див. рис. 3.3).

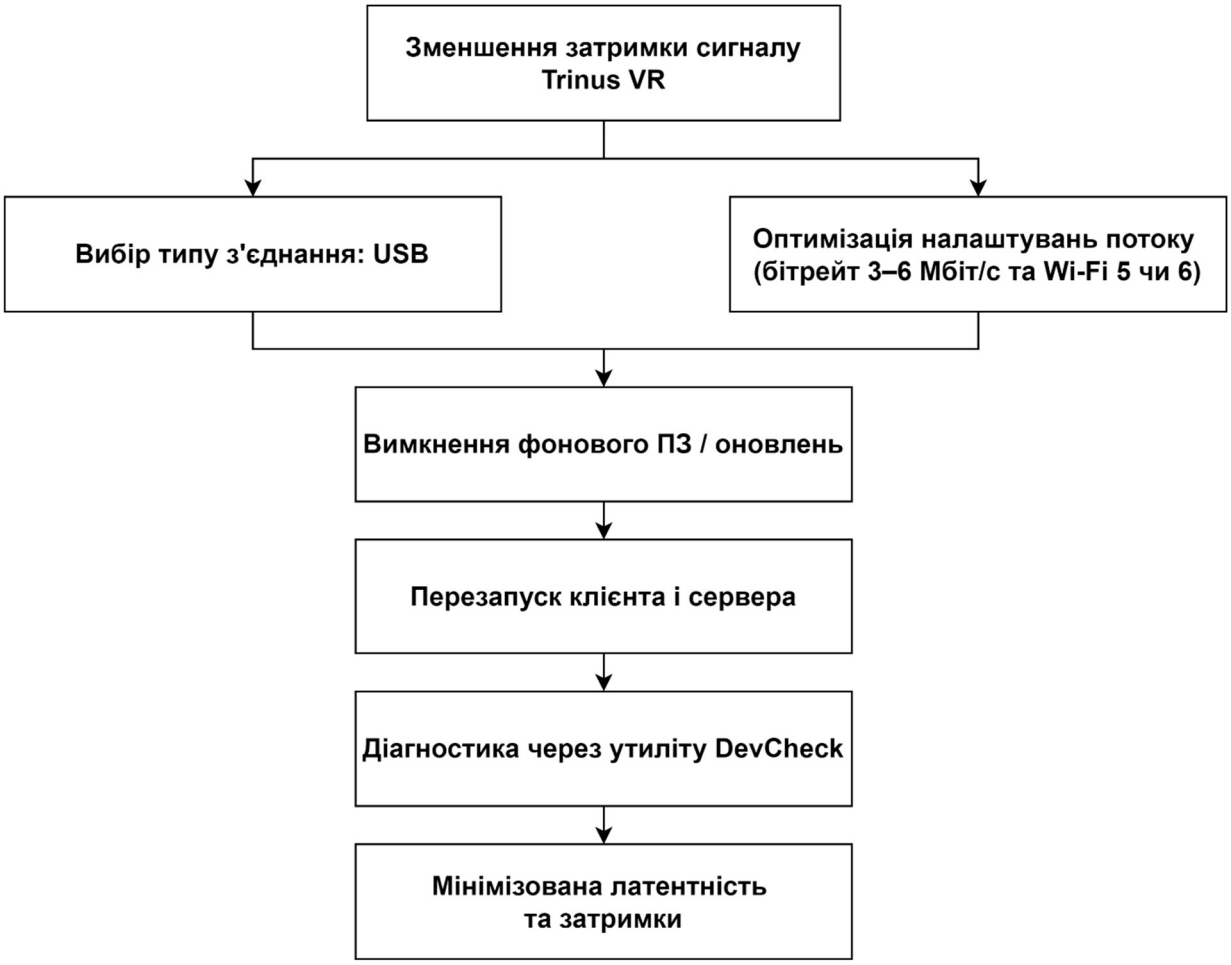


Рисунок 3.3 – Метод зменшення затримки сигналу
між клієнтом та сервером Trinus VR

У випадку з провідним підключенням така оптимізація менш критична, однак і тут важливо контролювати загальну стабільність роботи системи. Окрему увагу слід приділити вимкненню фонових оновлень, хмарної синхронізації та інших фонових процесів, які можуть переривати передавання даних і викликати тимчасові зависання або підвисання, особливо це стосується ноутбуків, де такі оновлення часто відбуваються у фоновому режимі без попередження користувача. Стабільна робота Trinus VR можлива також за умови використання якісного маршрутизатора,

розташованого поруч з пристроєм, із мінімальним навантаженням та хорошим рівнем сигналу, а у випадку виникнення будь-яких затримок корисним буде перезапуск як клієнтської, так і серверної частини Trinus VR, зважаючи на те, що програмне забезпечення перебуває у стані бета-версії та може мати непередбачувані збої. Для глибшої діагностики варто використовувати утиліти на кшталт DevCheck, які дають змогу виявити вузькі місця в продуктивності й налаштувати систему відповідно до поточних показників (див. рис. 3.4).

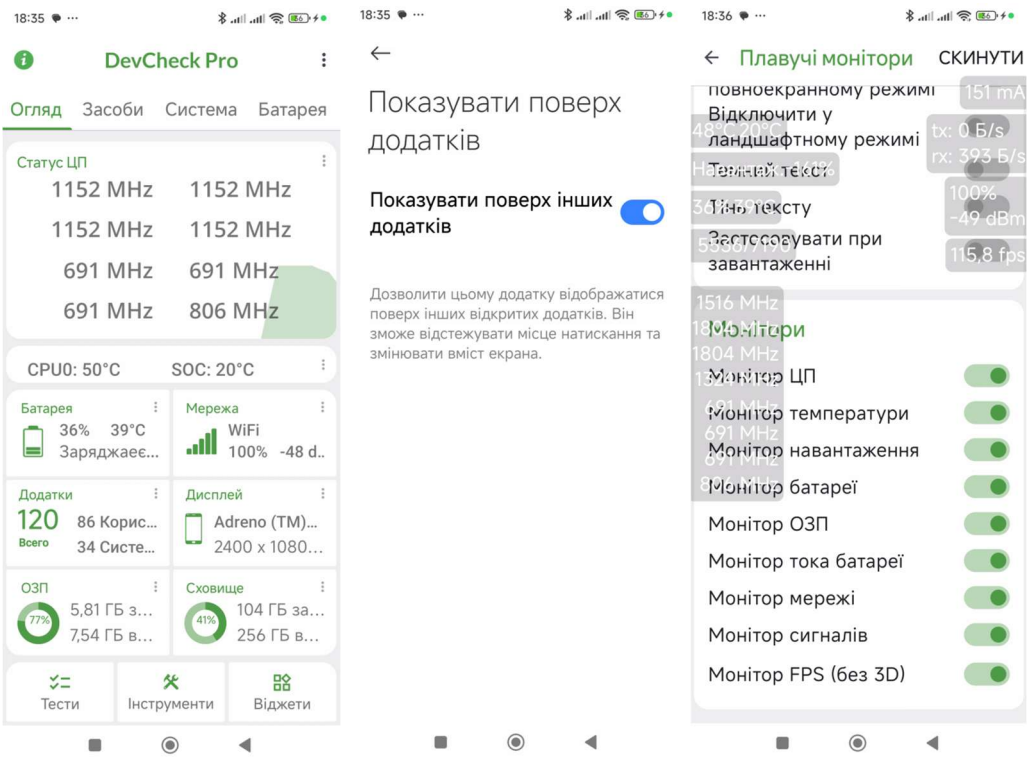


Рисунок 3.4 – Увімкнення показників продуктивності через утиліту DevCheck

Ігнорування цього етапу може призвести до хибного враження про ефективність оптимізації, адже зменшення затримки без її об’єктивного вимірювання позбавляє можливості контролювати динаміку змін. Комплексне впровадження наведених налаштувань суттєво підвищує плавність зображення і загальну якість VR-досвіду, що стає особливо помітним при тривалому використанні [27].

Вибір смартфона як критичний фактор якості занурення. Ключовим фактором, що безпосередньо впливає на якість занурення у VR-простір, є також вибір смартфона, який у системі Trinus VR виступає кінцевою ланкою обробки і

виводу віртуального зображення. Від технічних характеристик цього пристрою залежить не лише стабільність і чіткість візуального потоку, а й комфорт сприйняття та зменшення втоми очей, оскільки смартфон фактично формує зображення, яке користувач бачить крізь VR-гарнітуру. Мінімально рекомендованим значенням для дисплея є Full HD (1920×1080), однак чим вища щільність пікселів, тим менше помітний ефект пікселізації та реалістичніше зображення. Частота оновлення екрану також має вирішальне значення: хоча 60 Гц є прийнятним мінімумом, для створення більш плавного зображення бажано використовувати смартфони з частотою 90 або 120 Гц, що зменшує навантаження на очі й забезпечує краще сприйняття динамічних сцен. При цьому важливо впевнитися, що така частота дійсно активована в налаштуваннях, оскільки деякі пристрої автоматично знижують її до 60 Гц у режимі енергозбереження, що знижує загальну якість VR-досвіду. Не менш важливим є наявність гіроскопа та акселерометра, які відповідають за точне відстеження положення голови. У бюджетних моделях ці сенсори іноді мають занижену чутливість, що призводить до запізнілої або неточної реакції системи на рухи, тоді як смартфони середнього або флагманського класу здебільшого забезпечують належну якість хедтрекінгу. Щодо обчислювальної потужності, Trinus VR не потребує надвисоких ресурсів, але рекомендованими є моделі з процесорами рівня Snapdragon 800-серії, оскільки менш продуктивні пристрої можуть не справлятися з декодуванням відео в реальному часі, спричиняючи затримки, попри всю оптимізацію з боку сервера. У цьому контексті правильний вибір смартфона дозволяє значно покращити користувацький досвід без додаткових витрат на дорогі гарнітури. Також доцільно обирати пристрої не старші п’яти років, оскільки з плином часу оновлюються не лише характеристики, а й програмне забезпечення та системні вимоги, і старі моделі можуть бути просто неспроможними забезпечити належну продуктивність. Перед придбанням гарнітури рекомендовано провести тестування сумісності додатка, щоб переконатися в тому, що система працює стабільно й безперебійно, що можна зробити навіть без самої гарнітури, оцінюючи плавність зображення безпосередньо на екрані. Крім того, необхідно слідкувати за вільним обсягом

пам’яті: внутрішнє сховище має містити принаймні 20% вільного простору, оскільки нестача пам’яті веде до уповільнення роботи всіх додатків і появи артефактів, що суттєво знижує якість VR-досвіду. Такий підхід до вибору смартфона, враховуючи технічні та програмні особливості, забезпечує високий рівень занурення без значних фінансових вкладень, що робить технологію доступною для широкого кола користувачів і сприяє її активнішому поширенню в майбутньому (див. рис. 3.5) [27].

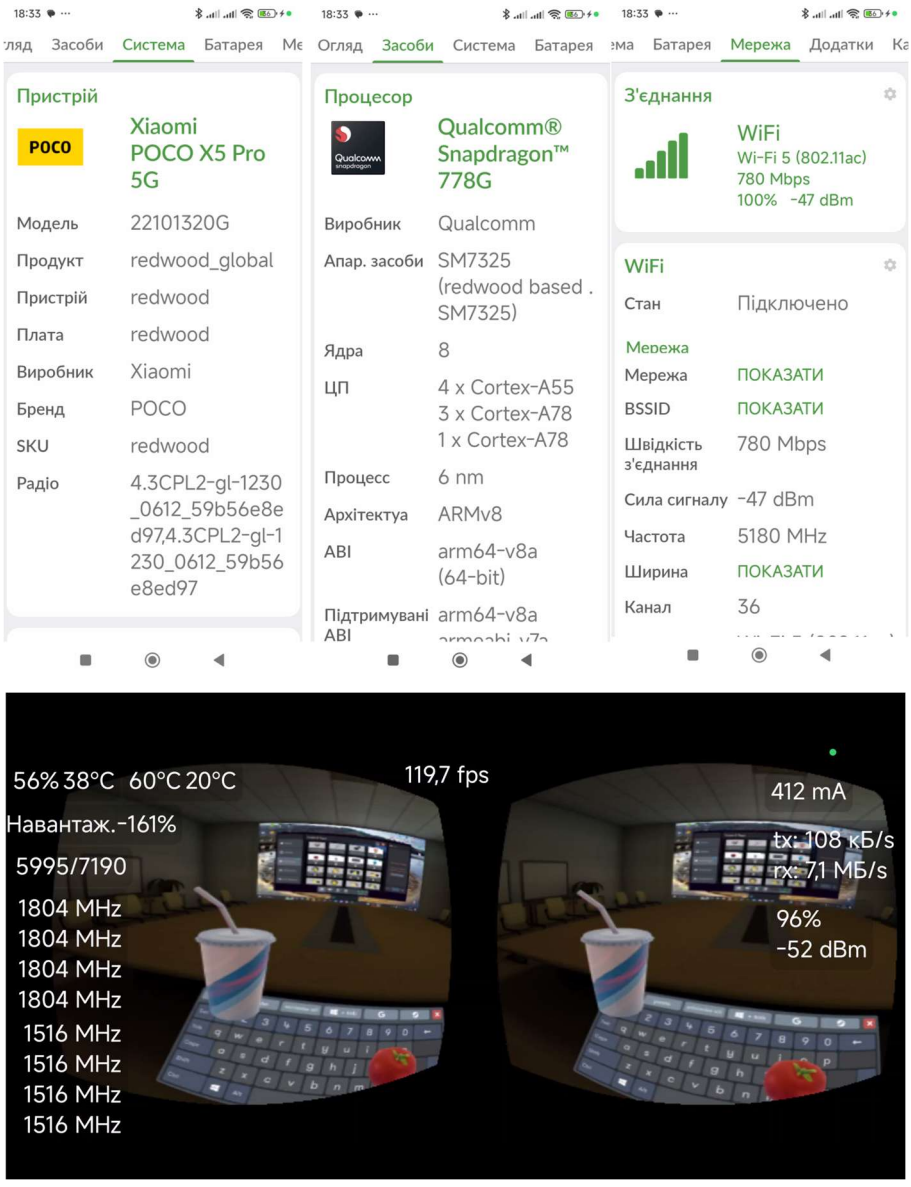


Рисунок 3.5 – Вплив характеристик смартфона на якість VR

Фізичні умови для комфортної роботи з VR – освітлення та простір. Комфортне та безпечне використання VR-технологій, навіть у випадку бюджетних гарнітур, залежить не лише від програмного забезпечення, а й від фізичних умов середовища. Освітлення, вентиляція та достатній простір є обов'язковими елементами, які суттєво впливають на якість занурення. Обмежений простір та дискомфорт можуть не лише зменшити ефект присутності у віртуальному середовищі, а й призвести до потенційних травм через зіткнення з предметами довкілля. Помірне освітлення — не повна темрява і не надмірна яскравість — необхідне для уникнення втоми очей або відблисків у лінзах, що можуть викликати зоровий дискомфорт і знижувати ефективність VR-сесії. У свою чергу, недостатня вентиляція призводить до нагрівання смартфона, особливо при інтенсивному використанні VR-додатків, що спричиняє явище тротлінгу — зниження продуктивності пристрою через перегрів. У деяких мобільних гарнітурах вже вбудовані пасивні або активні системи охолодження, які частково вирішують цю проблему, як, наприклад, у автономних рішеннях типу Meta Quest 3 [28].

Також важливим аспектом є забезпечення мінімального вільного простору для користувача, щонайменше один-два метри навколо, що дозволяє уникнути небажаних фізичних контактів із меблями або стінами, підвищуючи безпеку та знижуючи психологічне відчуття замкненості. З огляду на це, не менш значущим чинником є правильний вибір самої гарнітури. Навіть бюджетна пластикова гарнітура з регульованими лінзами та м'якою підкладкою здатна забезпечити прийнятний рівень комфорту. Наприклад, використана у проєкті гарнітура Esperanza забезпечує базову зручність, хоча й не належить до висококласних моделей. У порівнянні з картонними рішеннями на кшталт Google Cardboard, пластикові гарнітури з м'якими вставками, які зменшують тиск на обличчя, значно покращують досвід використання та дозволяють проводити VR-сесії довше без суттєвого дискомфорту (див. рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Використання комфортних матеріалів виготовлення у мобільній VR-гарнітурі Esperanza 3D VR EMV 400

Разом з тим, залишаються типові ризики тривалого використання віртуальної реальності, такі як:

— втома очей;
— головний біль;
— дезорієнтація після зняття гарнітури;
— запотівання лінз.

Усі ці проблеми вирішуються дотриманням базових правил експлуатації:

— використання антивологих вставок;
— періодичний відпочинок очей;
— правильне налаштування лінз;
— дотримання вентиляційних вимог.

Завдяки цим заходам можливо істотно збільшити тривалість роботи у VR без шкоди для здоров’я користувача чи навколишніх [28].

У підсумку, ефективне використання віртуального середовища в умовах дистанційної співпраці є завданням, що вимагає не лише якісної реалізації програмного рішення на кшталт Trinus VR, але й створення фізично комфортного середовища для користувача. Поєднання чіткого зображення, мінімізації затримок,

вибору відповідного смартфона та забезпечення оптимальних умов простору, освітлення й вентиляції дозволяє реалізувати повноцінну VR-співпрацю навіть за допомогою доступних рішень. Такий підхід розширює можливості віддалених команд і водночас знижує бар'єр входу у світ віртуальної колаборації, що особливо актуально в умовах сучасної цифрової трансформації.

3.2 Порівняльний аналіз бюджетних і комерційних рішень для VR-співпраці

Сучасні технології віртуальної реальності охоплюють широкий спектр рішень для організації дистанційної колективної роботи — від простих мобільних систем на базі смартфонів, таких як реалізоване рішення на Trinus VR, до високопродуктивних VR-гарнітур, які працюють автономно або у зв'язці з ПК. У такому контексті актуальним є аналіз доцільності вибору певного типу системи відповідно до бюджету, цілей і технічних вимог користувача. Систему Trinus VR зі смартфоном, яка реалізована за двохрівневою архітектурою «клієнт-сервер», доцільно порівняти з провідними комерційними VR-рішеннями, такими як Meta Quest 2 і 3, HTC Vive Pro та Pico 4, що набувають популярності в різних країнах, включно з Китаєм. У процесі такого порівняння необхідно враховувати як технічні характеристики, так і практичну ефективність у сфері віддаленої офісної співпраці при різних рівнях фінансування, оскільки не завжди є сенс використовувати найпотужніші та найдорожчі VR-пристрої, якщо вже наявне обладнання дозволяє досягти прийнятного рівня віртуального занурення, який вже є суттєво кращим за традиційні 2D-рішення [29].

Порівняння Trinus VR зі стаціонарними та автономними VR-системами. Якщо структурувати порівняння, можна виділити ключові гарнітури:

— Trinus VR + смартфон (запропонований підхід);

— Meta Quest 2 і 3;

— HTC Vive Pro;

— Pico 4.

Рішення на основі Trinus VR, реалізоване на смартфоні, є гібридом між мобільною та стаціонарною моделлю: його можна використовувати як автономно, так і у зв’язці з ПК через Wi-Fi або USB. Meta Quest 2 і 3 є повністю автономними системами з можливістю підключення до ПК, що забезпечує високу гнучкість і якість досвіду. HTC Vive Pro навпаки потребує обов’язкової прив’язки до потужного ПК і не має автономного режиму, натомість компенсує це високою точністю занурення і призначений переважно для симуляторів або професійних застосувань. Pico 4 є автономною гарнітурою з опцією підключення до ПК, що позиціонується як бюджетна, але функціональна альтернатива Meta Quest, забезпечуючи якість, наближену до більш дорогих моделей, при помірній ціні.

За критерієм вартості Trinus VR з бюджетною мобільною гарнітурою на кшталт Esperanza може коштувати в межах 5–50 доларів без урахування вартості смартфона, що робить це рішення найдоступнішим серед усіх. У порівнянні Meta Quest 2 має ціну приблизно від 300 доларів, Meta Quest 3 — від 500 доларів, HTC Vive Pro — від 700 до 1500 доларів, а Pico 4 — у межах 400–600 доларів, залежно від комплектації та ринку. Таким чином, бюджетне рішення дозволяє мінімізувати витрати, однак це позначається на якості зображення та функціональності.

Рівень дисплея в Trinus VR залежить виключно від роздільної здатності смартфона. При наявності Full HD дисплея фактична чіткість для кожного ока буде вдвічі меншою через поділ екрану навпіл, що знижує якість занурення і може викликати ефект «замиленого» зображення. У Meta Quest 3 використовується LCD-дисплей з роздільною здатністю 2064×2208 на кожне око, що забезпечує високу деталізацію й комфорт для зору, тоді як HTC Vive Pro має OLED-панель із роздільною здатністю 1440×1600 на око. Pico 4 пропонує екран 2160×2160 на око, що навіть перевершує деякі інші гарнітури у цьому сегменті.

Щодо трекінгу, Trinus VR покладається на гіроскоп та акселерометр смартфона, що дозволяє лише базове відстеження рухів голови, без точного позиційного трекінгу та підтримки рухів рук. Натомість у Meta Quest 2, 3 та Pico 4

реалізований повноцінний 6DoF-трекінг без зовнішніх баз, що забезпечує точне відстеження рухів користувача у просторі. У HTC Vive Pro трекінг реалізований за допомогою зовнішніх баз станцій, що дає найвищу точність, але ускладнює мобільність та розгортання системи.

Способи підключення також варіюються: Trinus VR використовує USB або Wi-Fi-з'єднання для трансляції зображення з ПК на смартфон. У Meta Quest присутня функція Air Link — безпровідній передачі через Wi-Fi — або провідне підключення через спеціальний кабель. HTC Vive Pro працює лише в режимі підключення до ПК через DisplayPort, що передбачає стаціонарне використання. Pico 4 забезпечує передачу даних як через Wi-Fi, так і за допомогою USB-кабелю, але без підтримки фірмових рішень на кшталт Air Link.

Контролери у Trinus VR відсутні як такі, керування реалізовано через Bluetooth-геймпад, що обмежує функціональність і не дозволяє реалізувати жестове управління чи повноцінний трекінг рук. У Meta Quest, HTC Vive Pro і Pico 4 застосовуються повноцінні VR-контролери з підтримкою 6DoF, що забезпечує вільне переміщення, розпізнавання жестів і високий рівень інтерактивності у віртуальному середовищі.

З огляду на підтримку платформ, Trinus VR сумісний із Android, Windows і Linux, що забезпечує гнучкість у використанні на різних пристроях. Meta Quest і Pico 4 працюють на базі Android із можливістю підключення до ПК, а HTC Vive Pro — лише у зв'язці з ПК через SteamVR або VivePort.

Призначення цих пристроїв суттєво впливає на вибір користувача: Trinus VR є демонстраційним і базовим варіантом, придатним для початкового знайомства з технологією VR. Meta Quest орієнтований на універсальне використання, включаючи ігри, спільну офісну роботу та зустрічі завдяки своїй автономності й простоті експлуатації. HTC Vive Pro — це професійне рішення для симуляцій, тренажерів та сценаріїв із глибоким зануренням, а Pico 4 виступає як універсальна альтернатива з балансом між ціною, якістю та функціональністю.

Таблиця 3.1 – Порівняння бюджетних та комерційних VR-рішень для дистанційної співпраці

Критерій	**Trinus VR + смартфон**	**Meta Quest 2 / 3**	**HTC Vive Pro**	**Pico 4**
Тип системи	**Гібрид мобільної/стаціонарної**	Автономна з опц. ПК-підключення	Стаціонарна, тільки з ПК	Автономна з опц. ПК-підключення
Ціна (USD)	**5–50 (без смартфона)**	300 / 500	700–1500	400–600
Дисплей / Роздільність	**Залежить від смартфона**	LCD, 2064×2208 (на око)	OLED, 1440×1600 (на око)	LCD, 2160×2160 (на око)
Трекінг	**Гіроскоп, без 6DoF**	6DoF, без базових станцій	6DoF, з базовими станціями	6DoF, без базових станцій
Підключення до ПК	**USB / Wi-Fi (Trinus Bridge)**	USB / Air Link (Wi-Fi)	Лише через DisplayPort	USB / Wi-Fi
Контролери	**Bluetooth-геймпад**	Повноцінні 6DoF контролери	Повноцінні 6DoF контролери	Повноцінні 6DoF контролери
Платформи	**Android, Windows, Linux**	Android + ПК	ПК (SteamVR, VivePort)	Android + ПК
Призначення	**Ознайомче / демонстраційне**	Ігри, офіс, універсальне	Професійне, симулятори	Альтернатива, збалансоване

В результаті можна зробити висновок (див. табл. 3.1), що бюджетне рішення з Trinus VR значно доступніше, але поступається за більшістю критеріїв комерційним моделям — зокрема в стабільності трекінгу, глибині занурення та

зручності керування, однак для ознайомлення з технологією та перших експериментів воно цілком підходить [29].

Переваги мобільного підходу у гнучкості та доступності. Мобільний підхід до віртуальної реальності на базі Trinus VR демонструє вагомі переваги в аспектах доступності та гнучкості, що є особливо важливим у контексті розширення технологій для широкого кола користувачів, включно з тими, хто не має змоги придбати дорогі VR-гарнітури. Використання смартфонів із достатньою продуктивністю разом із простими у виготовленні або придбанні картонними гарнітурами на зразок Google Cardboard, вартість яких іноді не перевищує кілька десятків гривень, формує надзвичайно низький бар'єр входу, що відкриває можливість апробації VR-технологій без потреби у складному обладнанні або великій інфраструктурі. Конструкція, реалізована в цьому дослідженні, є прикладом того, як навіть з мінімальними ресурсами можна забезпечити базове VR-занурення без необхідності у зовнішніх трекерах чи визначених зонах руху, достатньо лише мати гарнітуру і місце для сидіння. Таке рішення створює умови для пасивного, але все ж ефективного VR-досвіду, що є прийнятним для низки задач, де не вимагається повноцінна просторово-рухова взаємодія [29].

Окремої уваги заслуговує і програмна гнучкість, оскільки Trinus VR дозволяє запускати контент навіть з комп'ютерів середнього класу, включно з ноутбуками, що значно розширює коло потенційних користувачів і дозволяє інтегрувати VR навіть у тих середовищах, де раніше це було економічно або технічно неможливо. Таке рішення підходить як для навчальних закладів, так і для стартапів чи невеликих віддалених команд, яким необхідно протестувати можливості VR перед масштабними інвестиціями. Мобільний VR може виступати як прототип або тестовий етап для майбутньої інтеграції більш потужного обладнання на зразок Meta Quest 2 чи Oculus Rift S, дозволяючи попередньо оцінити доцільність таких витрат і зрозуміти, наскільки ефективною буде VR-колаборація в реальних умовах. Особливої актуальності це набуває у зв'язку зі зростаючою популярністю дистанційної роботи, де постає потреба у засобах, здатних замінити фізичну присутність у спільному офісі.

Ефективність мобільного VR у задачах офісної взаємодії. Незважаючи на обмеження, Trinus VR може бути дієвим інструментом в офісних сценаріях взаємодії. Хоча система не забезпечує повної функціональності, притаманної комерційним VR-рішенням, вона здатна виконувати базові задачі на прийнятному рівні. Завантаження презентацій або 3D-сцен з ПК, організація віртуальних зустрічей з ефектом присутності, перегляд і оновлення 3D-моделей, документації або прототипів у VR-середовищі – усе це можливе в межах функціоналу, який надає мобільний варіант. Також важливим є ефект психологічного занурення, який надає VR – на відміну від традиційних відеочатів, він створює сильніше відчуття присутності й спільної роботи, що позитивно впливає на командну динаміку. Хоча точний трекінг рук, розширене поле зору та висока якість візуалізації залишаються недоступними, у контексті офісного використання це не є критичним, адже більшість задач не потребують повної просторової інтеракції. Додатковим викликом є потреба в ручному налаштуванні та базових технічних знаннях, однак ці недоліки нівелюються завдяки повній безкоштовності програмного забезпечення, загальній простоті реалізації та надзвичайній доступності рішення для потенційно великої кількості користувачів у різних галузях.

Межі застосування мобільних VR-рішень у корпоративному середовищі. Попри загальну обґрунтовану привабливість і переваги бюджетних мобільних VR-рішень, межі їхнього застосування в корпоративному середовищі лишаються помітними, особливо якщо мова йде про масштабні чи критично важливі завдання, де від технології очікується не лише базове функціонування, а стабільність, безпека, точність та інтеграція в існуючі бізнес-процеси. Одним із суттєвих обмежень, що постає у таких середовищах, є питання безпеки даних, адже мобільні рішення на кшталт Trinus VR покладаються на домашні мережі, сторонні сервери або додатки, які можуть бути вразливими до атак чи витоків інформації, що є неприпустимим для компаній, де обіг інформації має суворо контролюватися. Додатково до цього фіксується низький рівень підтримки професійного UX – відсутність якісної графіки, точного позиціонування та загального враження занурення може бути неприйнятною для сценаріїв, де презентабельність і комфорт

користувача визначають успішність проєкту. Обмеження в трекінгу – зокрема неможливість багатокористувацького просторового розпізнавання, що є важливою умовою для проведення повноцінних VR-нарад – також суттєво обмежують використання таких рішень у колективній співпраці. Смартфони, які можуть бути неуніфікованими або такими, що не відповідають технічним вимогам, створюють додаткову варіативність і фрагментованість у середовищі, де зазвичай прагнуть до стандартизації. Відсутність спеціалізованих контролерів, яка позначається на низькому рівні інтерактивності та складності взаємодії з віртуальними об’єктами, ще більше підсилює ці обмеження – редагування документів або реальне маніпулювання 3D-елементами стає майже неможливим, що відкидає такий варіант для сценаріїв із високими вимогами до точності та дії (див. рис. 3.7).

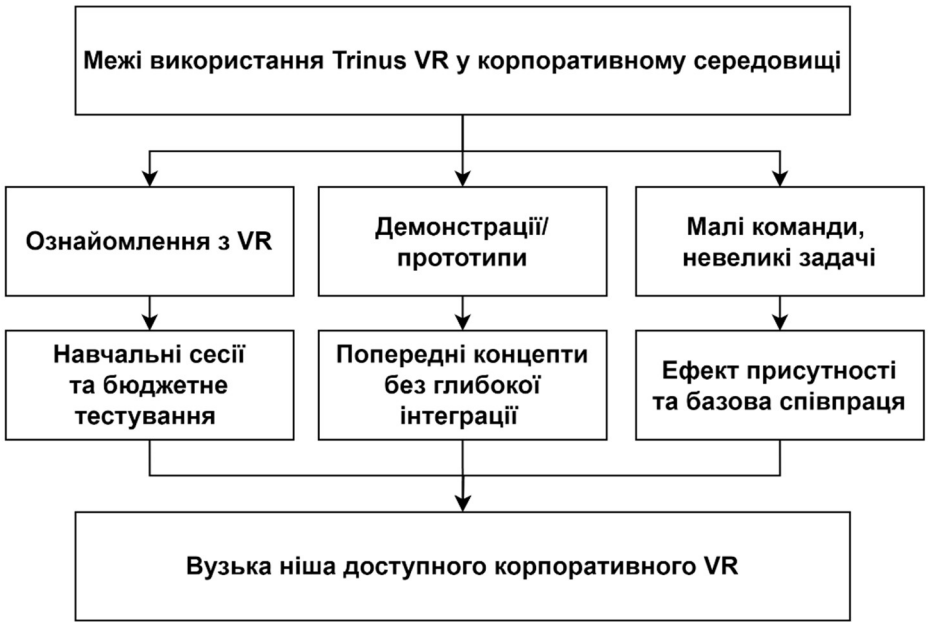


Рисунок 3.7 – Межі використання Trinus VR у корпоративному середовищі

Проте навіть за таких обмежень подібні мобільні рішення можуть ефективно використовуватися в окремих корпоративних контекстах, передусім як інструмент для попереднього ознайомлення з VR-технологіями, де вони можуть слугувати простим дослідницьким засобом або способом проведення коротких демонстрацій, які не вимагають глибокої інтеграції чи тривалого використання. Також вони можуть стати в нагоді під час попередньої розробки концепцій VR-середовищ

перед прийняттям рішення щодо масштабного впровадження, а в невеликих командах, де VR не є основним засобом взаємодії, але використовується для створення ефекту присутності або візуального представлення ідей, вони здатні забезпечити базовий рівень співпраці. Такий порівняльний аналіз дозволяє зробити висновок, що хоча бюджетне рішення на базі Trinus VR, смартфона та простої картонної гарнітури не конкурує з функціональністю комерційних пристроїв, воно займає унікальну нішу завдяки надзвичайній доступності, і саме ця доступність відкриває йому шлях до застосування в умовах обмеженого фінансування, де реалізація VR на початковому етапі не потребує значних вкладень (див. табл. 3.2) [29].

Таблиця 3.2 – Переваги мобільного VR-підходу Trinus VR у контексті доступної офісної взаємодії

Критерій	**Опис**
Вартість	Дуже низька (гарнітури типу Google Cardboard: кілька доларів, ПЗ Trinus VR — безкоштовне)
Технічні вимоги	Смартфон середнього рівня + ПК або ноутбук середнього класу
Гнучкість	Працює з Android, Windows, Linux; адаптивність до різних систем
Простота реалізації	Без зовнішніх трекерів, можливість використання сидячи
Сценарії використання	Перегляд презентацій, 3D-моделей, віртуальні зустрічі, ознайомлення з VR
Психологічний ефект	Створює відчуття присутності, підсилює командну взаємодію
Обмеження	Немає трекінгу рук, нижча якість зображення, ручне налаштування
Цільова аудиторія	Освітні заклади, стартапи, малі команди, які тестують VR перед масштабними витратами

Оцінка економічної доцільності використання бюджетного VR-рішення. З точки зору економічної доцільності, використання такого «клієнт-серверного» підходу з Trinus VR, смартфоном та мобільною гарнітурою, демонструє мінімальний фінансовий поріг входу:

— відсутність витрат на програмне забезпечення;

— повна безкоштовність сервера та клієнта;

— використання гарнітури вартістю лише 7,5 доларів (у випадку експерименту – Esperanza VR Box).

Усе це забезпечує середній бюджет на одного користувача на рівні, що не перевищує кількох доларів. У порівнянні з комерційними гарнітурами вартістю від 300 до 1500 доларів, таке рішення стає не просто доступним, а єдиним варіантом для швидкого входу в сферу VR. З цієї позиції воно може виступати оптимальним засобом для короткострокового навчання, ознайомлення, первинного тестування та перевірки гіпотез щодо ефективності VR у конкретному середовищі, що особливо важливо для тих компаній, які прагнуть мінімізувати ризики, пов’язані з інвестуванням у нові технології (див. рис. 3.8).

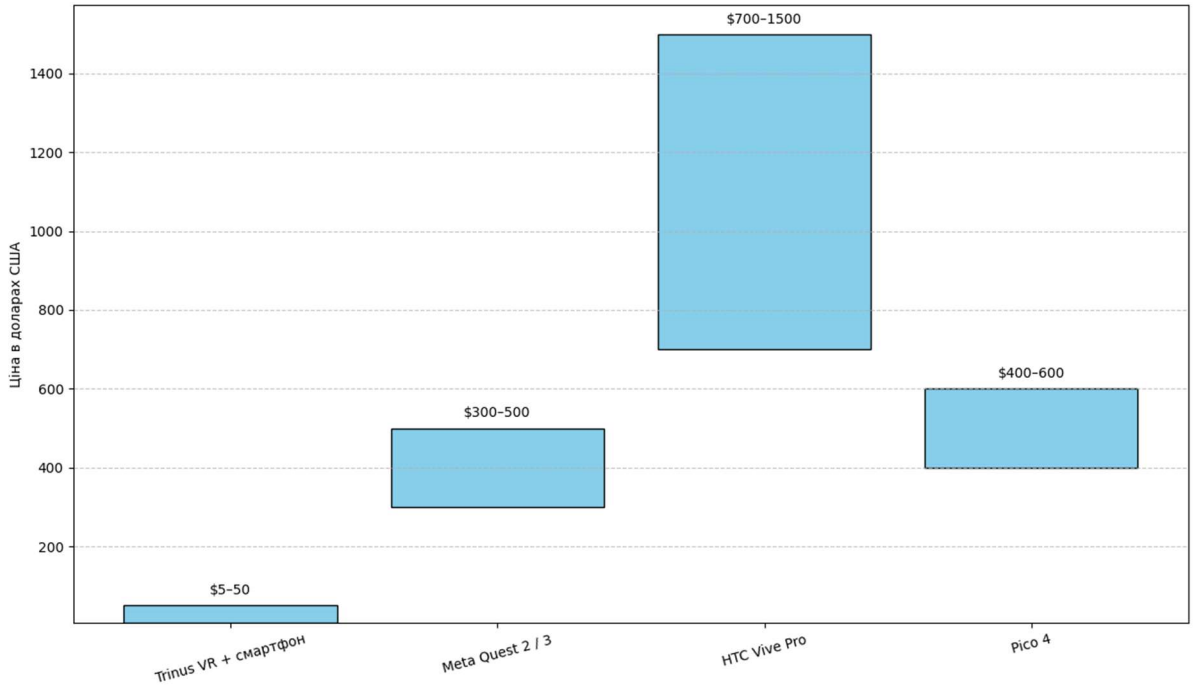


Рисунок 3.8 – Діаграма економічної доцільності первинного використання мобільної системи Trinus VR

Хоча постійне використання такого рішення в офісному середовищі виглядає малоймовірним через технічні обмеження та невисокий рівень комфорту, непрямі переваги, зокрема можливість швидкого розгортання без складного налаштування, низький ризик втрат у разі провалу впровадження, а також потенціал масштабування за умови наявності смартфонів у більшості працівників, додають до загальної економічної доцільності позитивних аргументів.

Таблиця 3.3 – Економічна ефективність Trinus VR для короткострокового VR-впровадження

Критерій	**Опис**
Вартість програмного забезпечення	Безкоштовне (Trinus VR Client + Server, BigScreen BETA як платформа взаємодії)
Вартість гарнітури	≈ 7,5 доларів (наприклад, Esperanza VR Box)
Загальний бюджет на користувача	В межах кількох доларів (без урахування смартфона)
Порівняння з комерційними VR	Комерційні гарнітури коштують 300–1500 доларів
Сценарії застосування	Первинне тестування, навчання, ознайомлення, перегляд презентацій, базова співпраця
Переваги	Мінімальний ризик, швидке розгортання, простота реалізації, безкоштовне ПЗ
Обмеження	Низька якість, обмеження по трекінгу, немає повноцінної взаємодії з віртуальними об’єктами
Потенціал масштабування	Можливий при наявності смартфонів у більшості користувачів

У підсумку Trinus VR у поєднанні з мобільними пристроями (див. табл. 3.3) демонструє себе як бюджетне рішення, придатне для тестування VR-комунікації, ознайомлення з технологіями та реалізації короткострокових проектів, у той час як для довготривалого стійкого використання в професійному корпоративному

середовищі доцільно розглядати інвестиції в повноцінні комерційні гарнітури, що забезпечать відповідний рівень якості, надійності й інтеграції.

3.3 Методичні рекомендації щодо впровадження VR-технологій у робочі процеси

Впровадження технології віртуальної реальності в робочі процеси командної або корпоративної діяльності не обмежується лише технічною доступністю пристроїв, адже ефективне застосування передбачає наявність продуманої методики дій, що особливо актуально для організацій із обмеженим бюджетом, які тим не менш прагнуть оцінити потенціал VR у контексті колективної взаємодії. У цьому випадку доцільним є представлення покрокових рекомендацій щодо реалізації недорогого впровадження VR на базі Trinus VR та смартфонів, а також заходів, необхідних для забезпечення стабільної, безпечної й ефективної роботи всієї системи, з урахуванням її експериментального чи дослідницького характеру [30].

Початкові кроки – підготовка до впровадження VR. На початковому етапі, до того як перейти безпосередньо до інтеграції VR, слід здійснити комплексну підготовку, що включає як організаційні, так і технічні дії, адже неконтрольоване або спонтанне використання VR без стратегічного обґрунтування може призвести до неефективного витрачання ресурсів та нереалістичних очікувань. Першочергово варто з’ясувати, чи існує в компанії об’єктивна потреба в ефекті присутності, тривимірних візуалізаціях чи зануренні у спільні простори, тобто чи реально використання VR здатне покращити продуктивність у конкретному процесі, чи насправді робота й надалі може бути ефективною у класичному відеоформаті або в межах традиційних комунікаційних платформ. Далі доцільно визначити учасників пілотного проєкту — переважно невеликі команди з дистанційним форматом

роботи, на прикладі яких можна провести первинне тестування технології та зробити висновки щодо її подальшої доцільності [30].

Необхідним етапом є також перевірка сумісності та готовності технічного забезпечення: усі персональні комп'ютери, що беруть участь у тестуванні, мають підтримувати графічні бібліотеки на кшталт OpenGL або DirectX, бути підключеними до стабільного Wi-Fi або мати надійне USB-з'єднання, а також бути сумісними з програмним забезпеченням, яке забезпечує трансляцію відео з ПК на смартфон. Зі сторони користувача обов'язковою умовою є наявність смартфона з достатнім рівнем продуктивності, що здатний обробляти зображення у VR-форматі та працювати із встановленим клієнтом Trinus VR. Після цього здійснюється демонстраційне використання базової мобільної гарнітури та Trinus VR у режимі «клієнт-серверного» підключення, що дозволяє сформувати первинне враження про рівень занурення та зручність використання.

Наступним кроком рекомендується інтеграція допоміжного програмного забезпечення для створення віртуального середовища, наприклад Mozilla Hubs — платформи, яка дозволяє створити спільні VR-простори через веб-інтерфейс, або VRChat, який підтримує більш розширену взаємодію й дозволяє змоделювати ситуації колективної присутності, хоч і вимагає більше ресурсів. За необхідності можуть застосовуватися додаткові засоби дистанційного керування або трансляції, зокрема TeamViewer або інші утиліти, що дозволяють передавати сигнал між пристроями без складного мережевого налаштування. Такий підхід дозволяє сформувати реалістичні очікування від використання VR у корпоративному середовищі, що є критичним етапом перед ухваленням рішень щодо подальших інвестицій.

Хоча рівень занурення, який забезпечується за допомогою смартфона, Trinus VR та бюджетної гарнітури, не може повністю відповідати комерційним рішенням із точним трекінгом і високою частотою оновлення кадрів, подібний підхід дозволяє ефективно оцінити, чи дійсно віртуальна реальність як інструмент комунікації та взаємодії виправдовує витрати часу, сил і ресурсів, необхідних для її впровадження. У разі позитивного результату базового тестування така система

може стати основою для подальшого переходу до повноцінних VR-рішень, а в разі виявлення невідповідності очікуванням дозволить уникнути зайвих витрат.

Інструкції з впровадження Trinus VR як тестової системи. Trinus VR — це безкоштовна система, яка забезпечує трансляцію VR-зображення з персонального комп'ютера на смартфон, що дозволяє використовувати її як базовий тестовий інструмент для попередньої оцінки потенціалу віртуального середовища без значних фінансових витрат. Первинне впровадження такої системи починається зі встановлення Trinus VR Server на ПК шляхом завантаження його з офіційного вебсайту та інсталяції з правами адміністратора, після чого обирається режим підключення — через Wi-Fi або USB залежно від технічних можливостей та стабільності з'єднання. Паралельно здійснюється інсталяція Trinus VR Client на смартфон, що можливо через Google Play, App Store або за допомогою APK-файлу, розміщеного на офіційному ресурсі, а після першого запуску необхідно надати додатку доступ до гіроскопа, мережі, а за потреби — й камери. Смартфон розміщується всередині гарнітури типу Google Cardboard, у тестуванні використовувалася бюджетна гарнітура Esperanza, після чого налаштовується підключення: при Wi-Fi-режимі обидва пристрої повинні бути в одній локальній мережі, тоді як у разі USB-з'єднання активується режим налагодження на смартфоні, і тоді вже підключення до мережі не є обов'язковим.

Наступним кроком є запуск VR-додатку на комп'ютері, таким може бути Mozilla Hubs через браузер у VR-режимі або SteamVR, що успішно функціонує разом із Trinus VR при коректному запуску через Steam. Далі здійснюється тестування сигналу, аналіз затримок, налаштування роздільної здатності відповідно до можливостей пристроїв і вимог до якості, що дозволяє досягти мінімально комфортного рівня занурення в демонстраційне середовище, не претендуючи на повноцінну заміну дорогих VR-гарнітур. Такий формат використання слугує як експериментальна база для прийняття подальших рішень щодо повноцінного VR-впровадження на підприємстві (див. рис. 3.9).

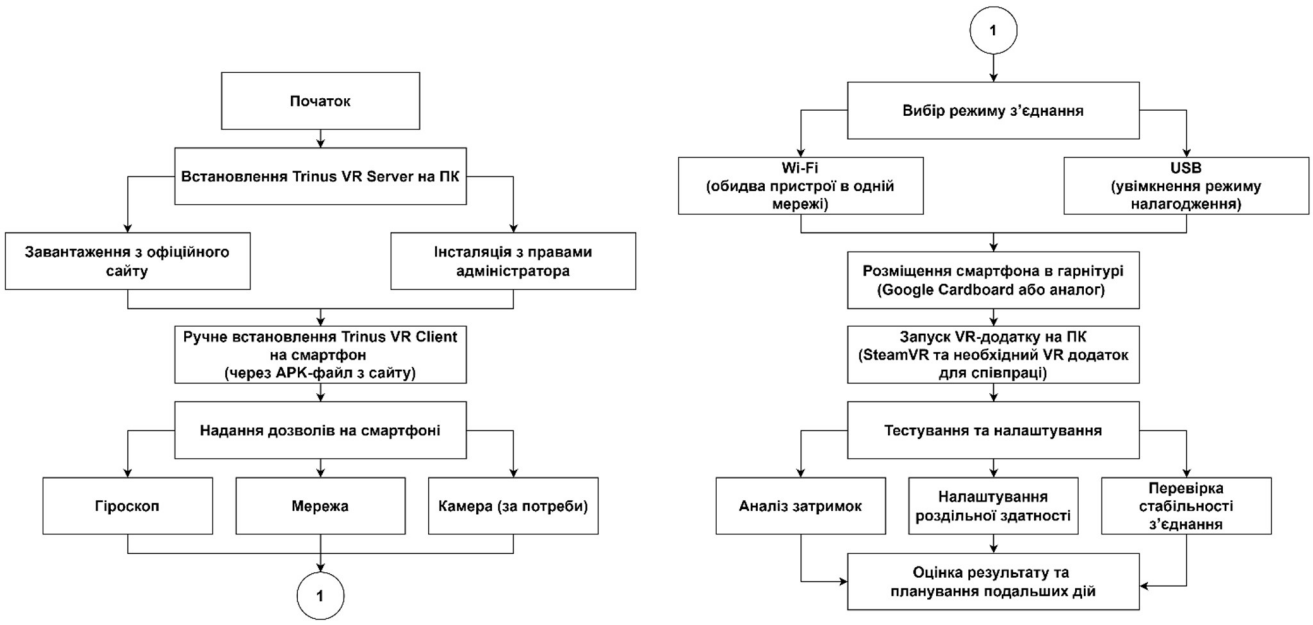


Рисунок 3.9 – Інструктивна схема щодо налаштування мобільної системи Trinus VR

Поетапне впровадження VR у компанії. Впровадження VR у робочі процеси має відбуватися поетапно, під контрольованим керівництвом і без примусу, у форматі експериментального використання, що дозволяє поступово адаптувати працівників, не викликаючи у них відторгнення нової технології, що не має бути наказом або зобов'язанням, а радше демонстрацією, мета якої — дати змогу командам оцінити переваги VR у ситуаціях, де потрібне візуальне обговорення моделей, об'єктів або спільна присутність у віртуальному просторі. У якості першого етапу визначається пілотна група — декілька співробітників, які будуть застосовувати VR у своїй щоденній роботі, зокрема під час обговорень, зустрічей або демонстрацій. Після цього відбувається короткий інструктаж для користувачів, у межах якого їм надається базове навчання з користування VR, включно з технічними аспектами, правилами безпеки, підтримкою з боку IT-відділу та короткою інформацією про обмеження тестової системи. У цей самий період наголошується на тому, що демонстраційна платформа не відображає повною мірою можливості професійних VR-рішень і є лише імітацією базового досвіду, яка допоможе краще уявити потенційний функціонал у разі переходу на повноцінне середовище [30].

Після проходження тестового періоду збираються дані зворотного зв’язку від користувачів, які дозволяють виявити як позитивні враження, так і технічні або організаційні труднощі. Паралельно проводиться аналіз загального рівня залучення працівників до процесу, оцінюється, чи зменшилася кількість непорозумінь під час дистанційної взаємодії, а також наскільки VR сприяє покращенню командної комунікації. Якщо зібрані результати свідчать про підвищення ефективності або хоча б вказують на перспективу розвитку у цьому напрямі, це може слугувати аргументом для подальшого поширення VR на інші відділи компанії. Такий поетапний підхід зменшує ризики, дозволяє уникнути надмірних витрат на початку, забезпечує можливість швидкого коригування курсу впровадження у разі непередбачених труднощів і формує ґрунт для прийняття обґрунтованих рішень щодо модернізації робочого середовища (див. рис. 3.10) [30].



Рисунок 3.10 – Алгоритм поетапного впровадження VR

Ризики та заходи стабільності й безпеки VR-взаємодії. Попри очевидні переваги віртуальної реальності, її використання супроводжується низкою потенційних ризиків як для окремих користувачів, так і для загальної стабільності корпоративного середовища, зокрема, технічні складнощі, які можуть виникати через затримки передачі сигналу при слабкому Wi-Fi з’єднанні, що безпосередньо впливає на якість взаємодії, спричиняючи погіршення досвіду, появу візуальних артефактів, можливий перегрів смартфона, що у випадку тривалого навантаження призводить до зниження продуктивності, фреймрейт-дропів або навіть повного вимкнення пристрою, а також проблеми сумісності між VR-додатками на ПК і

Trinus VR, які можуть мати обмеження у відображенні зображення або некоректно працювати внаслідок відсутності оптимізації. Для зниження таких ризиків доцільно переходити на провідне підключення через USB під час демонстрацій або критичних сесій, що хоча й обмежує свободу руху, але забезпечує стабільність потоку, мінімізуючи затримки та покращуючи якість зображення, дозволяючи при цьому розпізнавати жести або рухи голови колег, створюючи базовий ефект присутності навіть без повноцінних трекерів. Для більшої інтерактивності можливе використання геймпадів або контролерів, які можуть частково компенсувати відсутність повноцінної взаємодії у тривимірному середовищі, а також обов'язковим є забезпечення вентиляції приміщення та охолодження пристроїв, оскільки інтенсивне використання VR сприяє підвищенню температури як самих гаджетів, так і користувача, і в разі відсутності належного повітрообміну можлива поява дискомфорту, особливо в гарнітурах закритого типу. Перед запуском будь-якої VR-сесії необхідно протестувати конфігурацію системи на кількох пристроях, аби виявити несумісності, уникнути неочікуваних збоїв під час демонстрації та скоротити час налаштування за рахунок поширення готових конфігураційних файлів, підготовлених технічними спеціалістами, що дозволяє працівникам без додаткових технічних навичок швидко підключитися до VR-середовища. Поряд із цим виникає питання безпеки даних та конфіденційності, оскільки Trinus VR не підтримує шифрування переданого відеопотоку, що накладає обмеження на передачу чутливої або внутрішньої інформації, яку не варто демонструвати в такому відкритому середовищі, тож варто уникати потенційно вразливих ситуацій, що можуть бути використані зловмисниками або просто спричинити витік небажаних візуальних даних, особливо якщо VR-сесія записується. Як один із захисних заходів можливо використання корпоративного Wi-Fi з VPN або ізоляція VR-активностей в окремі облікові записи без доступу до основних інформаційних систем підприємства [30].

Поради для ефективного використання в команді. Для забезпечення ефективної взаємодії у команді бажано впроваджувати базові організаційні підходи, зокрема, планування VR-сесій за розкладом, що дозволяє уникнути

хаотичного використання гарнітур і забезпечує стабільне занурення в процес, адже несподівані підключення чи перевантаження інфраструктури можуть призвести до погіршення досвіду. Оптимальна тривалість одного VR-сеансу не повинна перевищувати 20–30 хвилин без перерви, оскільки довше перебування у гарнітурі спричиняє втому, зниження концентрації та навіть фізичний дискомфорт, тож дотримання цього обмеження має стати базовим правилом використання. Окрім того, доцільно передбачити резервний сценарій у вигляді звичайного онлайн-зв'язку або офлайн-наради, який дозволить уникнути зупинки обговорень або втрати важливої інформації у разі збоїв у VR-середовищі. При колективному використанні гарнітур надзвичайно важливою є гігієна обладнання, тобто регулярне очищення корпусу, лінз, ременів та смартфонів, що вставляються в шолом, особливо в умовах спільного використання на робочому місці, де пристрої передаються між кількома співробітниками. Додатково ефективності сприяє залучення працівників до створення віртуальних офісів, кастомізації аватарів та середовища, що сприяє не тільки кращій адаптації, але й створенню психологічного відчуття причетності до нового формату, адже персонал бачить результат власної участі у формуванні простору.

Використання доступного інструменту, як-от Trinus VR, не потребує значних витрат, оскільки програмне забезпечення працює у парі зі смартфоном і мобільною VR-гарнітурою типу Cardboard або Esperanza, дозволяючи швидко протестувати віртуальне співробітництво, оцінивши його перспективність перед переходом до дорожчих і функціональніших рішень, і саме така модель дозволяє уникнути передчасних інвестицій, натомість надаючи змогу підготувати колектив до нових форматів комунікації. Загальна ефективність VR не зводиться до наявності дорогого обладнання, а залежить від чіткої методичної організації процесу впровадження, що охоплює навчання, технічну підтримку, початкове тестування, поступовість дій і врахування ризиків, що в сукупності дозволяє досягнути максимальної користі навіть від базових рішень, підтвердженням чого є використання недорогого Trinus VR у даній роботі як робочої альтернативи повноцінним VR-системам.

ВИСНОВКИ

Зібрана бюджетна VR-система на базі Trinus VR та смартфона підтвердила свою працездатність як мінімально необхідне рішення для створення ефекту присутності у віртуальному середовищі. Вона забезпечує передачу зображення з ПК у VR-форматі через USB або Wi-Fi, підтримує просте керування за допомогою гіроскопа, і дозволяє запускати базові VR-додатки, що надає змогу інтегрувати технологію VR у робочі процеси без значних фінансових витрат.

Попри обмежену точність трекінгу та відсутність повноцінних контролерів, система виявилась достатньою для перегляду 3D-презентацій, участі у віртуальних зустрічах і базової взаємодії з простими сценами. Вона не потребує складного налаштування, що робить її зручною для використання в обмеженому просторі, зокрема у домашніх умовах або офісах з невеликою площею.

Тестування також виявило низку технічних труднощів, серед яких — затримки зображення при безпровідному підключенні, залежність якості занурення від характеристик смартфона, а також потреба в ручному налаштуванні Trinus VR-клієнта. Проте ці проблеми не є критичними для ознайомлення з VR та виконання нетривалих сесій спільної взаємодії.

Порівняння з комерційними VR-системами показало, що хоча Trinus VR суттєво поступається у функціональності, воно забезпечує унікальне поєднання низької вартості, доступності та достатнього функціоналу для початкових сценаріїв дистанційної співпраці, що дозволяє вважати таке рішення доцільним для навчання, прототипування або попереднього тестування VR-технологій у невеликих командах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. History of Email. The Radicati Group. URL: https://www.radicati.com/wp/wp-content/uploads/2019/01/Email-Statistics-Report-2019-2023-Executive-Summary.pdf (дата звернення: 24.02.2025).
2. What is cloud computing? IBM. URL: https://www.ibm.com/cloud/learn/cloud-computing (дата звернення: 27.02.2025).
3. How COVID-19 transformed the future of work. McKinsey & Company. URL: https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/how-covid-19-transformed-the-future-of-work (дата звернення: 28.02.2025).
4. What is virtual reality? – Extended Reality Definition. Unity. URL: https://unity.com/solutions/vr (дата звернення: 02.03.2025).
5. Types of VR systems. TechTarget. URL: https://www.techtarget.com/whatis/definition/virtual-reality (дата звернення: 04.03.2025).
6. Building virtual environments – the fundamentals. Unreal Engine Documentation. URL: https://docs.unrealengine.com/en-US/WorkingWithContent/CreatingVirtualWorlds/index.html (дата звернення: 07.03.2025).
7. Minimum hardware requirements for VR. NVIDIA. URL: https://developer.nvidia.com/vrworks (дата звернення: 08.03.2025).
8. Benefits of VR for teamwork. XR Today. URL: https://www.xrtoday.com/virtual-reality/benefits-of-vr-collaboration/ (дата звернення: 12.03.2025).
9. Top VR platforms for remote teams. TechRepublic. URL: https://www.techrepublic.com/article/top-vr-platforms-for-remote-work/ (дата звернення: 14.03.2025).
10. VR for enterprise collaboration. Forbes. URL: https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2023/03/10/vr-in-the-future-of-enterprise-collaboration/ (дата звернення: 17.03.2025).
11. Social psychology of VR. Frontiers in Psychology. URL: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.652737/full (дата звернення: 19.03.2025).
12. Presence in virtual environments. Stanford Virtual Human Interaction Lab. URL: https://vhil.stanford.edu/ (дата звернення: 21.03.2025).
13. VR fatigue and cognitive load. ScienceDirect. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360131522000424 (дата звернення: 21.03.2025).
14. Best VR collaboration platforms in 2025. XR Today. URL: https://www.xrtoday.com/virtual-reality/best-vr-collaboration-tools/ (дата звернення: 24.03.2025).

15. Comparing VR systems: tethered vs standalone vs mobile. Lenovo. URL: https://techtoday.lenovo.com/us/en/solutions/vr (дата звернення: 25.03.2025).
16. Why VR headsets are still not mainstream. Wired. URL: https://www.wired.com/story/why-vr-headsets-arent-mainstream/ (дата звернення: 27.03.2025).
17. Mobile VR for office use. Medium. URL: https://medium.com/@vrsolutions/mobile-vr-for-remote-workplaces-a5a1f63c1fdd (дата звернення: 30.03.2025).
18. How Trinus VR works. Trinus Official. URL: https://www.trinusvirtualreality.com/ (дата звернення: 01.04.2025).
19. Components of a basic VR system. XR Bootcamp. URL: https://www.xrbootcamp.com/blog/vr-architecture (дата звернення: 03.04.2025).
20. Recommended specs for PC VR. SteamVR. URL: https://store.steampowered.com/steamvr (дата звернення: 05.04.2025).
21. Smartphone screen quality and VR experience. Android Authority. URL: https://www.androidauthority.com/smartphone-display-quality-vr-832841/ (дата звернення: 07.04.2025).
22. Trinus VR setup over USB vs Wi-Fi. Trinus Support. URL: https://trinusvirtualreality.zendesk.com/hc/en-us/articles/115000658892 (дата звернення: 11.04.2025).
23. Power consumption in mobile VR. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/340428621 (дата звернення: 13.04.2025).
24. VR use cases for teams. TechCrunch. URL: https://techcrunch.com/2022/11/30/vr-collaboration-apps (дата звернення: 15.04.2025).
25. Using Trinus VR for office meetings. GitHub Gists. URL: https://gist.github.com/vrenthusiast/trinus-vr-office-guide (дата звернення: 18.04.2025).
26. Setup guide – Trinus VR. Trinus Docs. URL: https://trinusvirtualreality.com/download/ (дата звернення: 22.04.2025).
27. Troubleshooting Trinus VR latency. Reddit. URL: https://www.reddit.com/r/TrinusVR/comments/ (дата звернення: 26.04.2025).
28. Comfort and space requirements for VR. Oculus Support. URL: https://www.meta.com/help/quest/articles/in-vr-experience/comfort/ (дата звернення: 30.04.2025).
29. Comparing VR headsets. Tom’s Hardware. URL: https://www.tomshardware.com/reviews/best-vr-headsets,review-7061.html (дата звернення: 02.05.2025).
30. Enterprise VR integration strategy. Deloitte Insights. URL: https://www2.deloitte.com/insights/us/en/focus/tech-trends/2024/enterprise-vr-deployment.html (дата звернення: 05.05.2025).
31. Клець О.В. Вивчення можливостей використання VR для віддаленої командної співпраці. «Проблеми комп’ютерної інженерії»: Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.13-14.
32. Клець О.В., Зуб О.В. Застосування технологій віртуальної реальності для покращення віддаленої командної взаємодії. «Сучасний стан та перспективи

розвитку IoT» : VI Науково-техн. конф., м.Київ, 15 квітня 2025 р. (подано до публікації).

Додаток А

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра Комп'ютерної інженерії



КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

НА ТЕМУ: «VR ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СФЕРИ ВІДДАЛЕНОЇ СПІВПРАЦІ КОМАНД»

Виконала студентка групи КІД-42
Клець Ольга Віталіївна
Керівник дипломної роботи:
Зуб Олександр Вікторович,
асистент кафедри КІ

Київ – 2025

Мета, об’єкт, предмет дослідження

Мета роботи – спрощення впровадження віртуальної реальності у віддалену співпрацю малих команд за рахунок використання бюджетних VR-рішень і моделей взаємодії на основі стандартних мобільних пристроїв

Об’єкт дослідження – процес організації віддаленої колективної взаємодії у віртуальному середовищі

Предмет дослідження – апаратні та програмні VR-засоби для реалізації спільної присутності у віртуальному просторі на основі бюджетної інфраструктури

Актуальність роботи

У роботі розглянуто доступні засоби створення VR-середовищ для віддаленої співпраці з фокусом на використання смартфонів і безкоштовного програмного забезпечення Trinus VR як альтернативи дорогим VR-системам. Наведено порівняльний аналіз популярних VR-рішень за технічними характеристиками, вартістю, зручністю використання та придатністю до офісної взаємодії.

Запропоновано методичні рекомендації для компаній, які бажають впровадити VR без значних витрат, та розроблено поетапну інструкцію з налаштування тестового середовища. Проведено оцінку економічної доцільності мобільного підходу, визначено обмеження та варіанти ефективного застосування VR у навчанні, демонстраціях і на початкових етапах цифрової трансформації командної співпраці.

Потреба застосування VR у віддаленій командній роботі



Рис. 1.3 – Прискорення цифровізації під час пандемії COVID-19

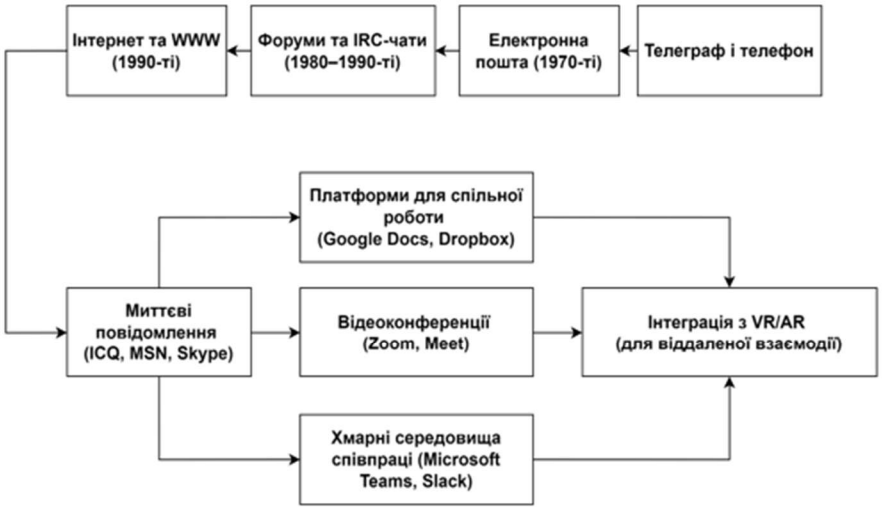


Рис. 1.1 – Еволюція засобів цифрової комунікації

Класифікація VR-рішень та аналіз можливостей співпраці у VR

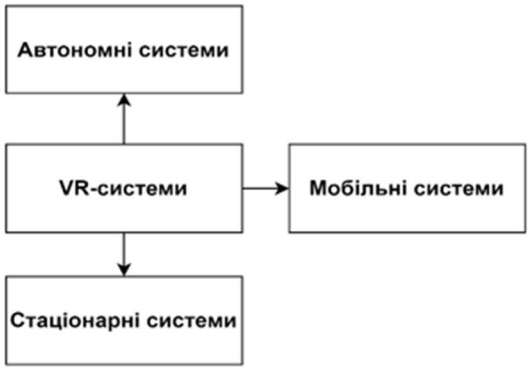


Рис. 1.4 – Класифікація VR-систем за типом роботи



Рис. 1.5 – Зовнішній вигляд автономних, стаціонарних та мобільних VR-рішень: Meta Quest 3, HTC VIVE Pro 2 та VR Shinecon G10



Рис. 1.8 – Приклад віртуального офісу для спільної взаємодії: Horizon Workrooms (для VR-гарнітур Meta)



Рис. 1.9 – Віртуальне робоче місце в VR-середовищі: Virtual Desktop

Архітектура реалізації мобільної VR системи

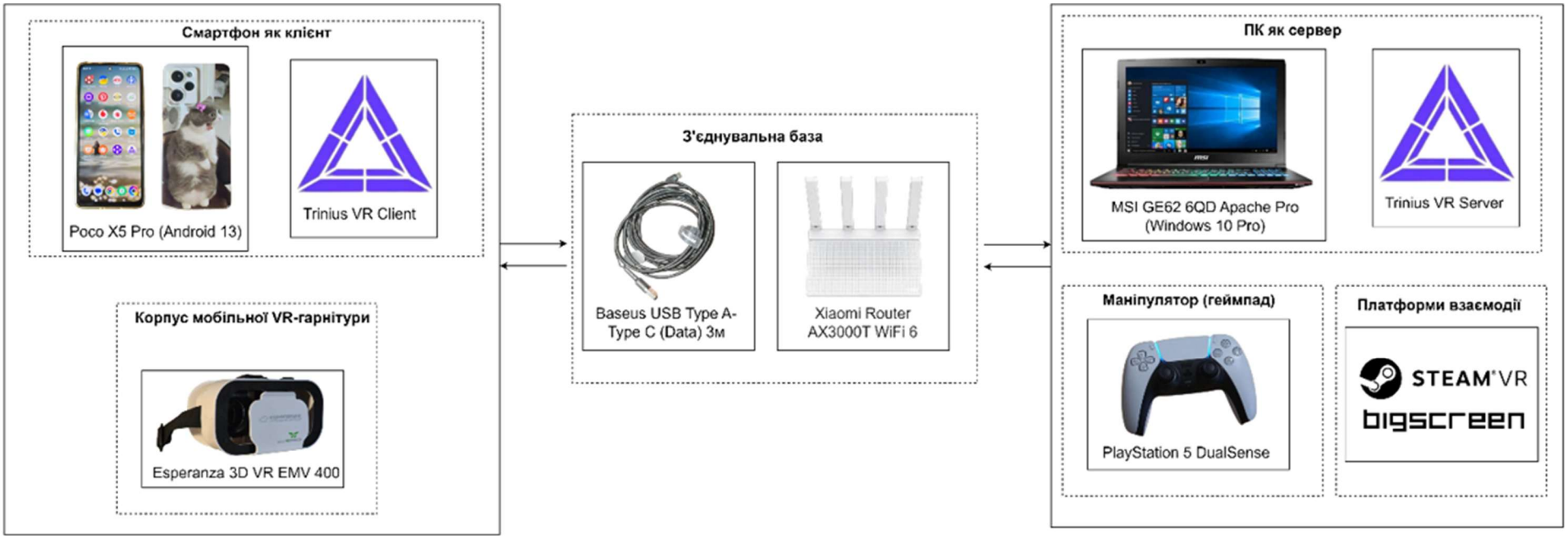


Рис. 2.3 – Архітектура інтегрованої системи віртуальної взаємодії на основі Trinus VR та смартфона

Демонстрація роботи мобільної VR системи



Рис. 2.4 – Зв'язок між компонентами системи візуалізації

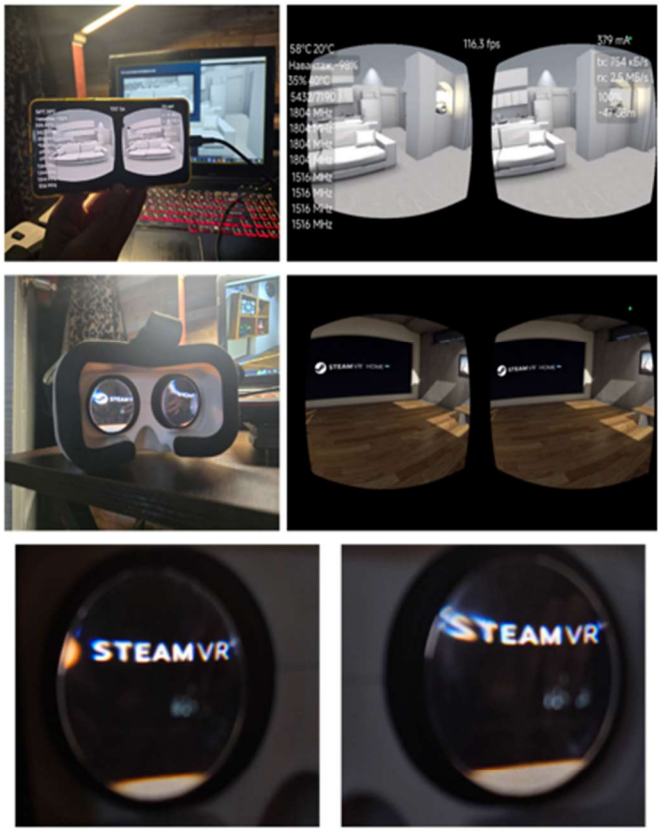


Рис. 2.18 – Екран смартфона під час роботи Trinus VR Client

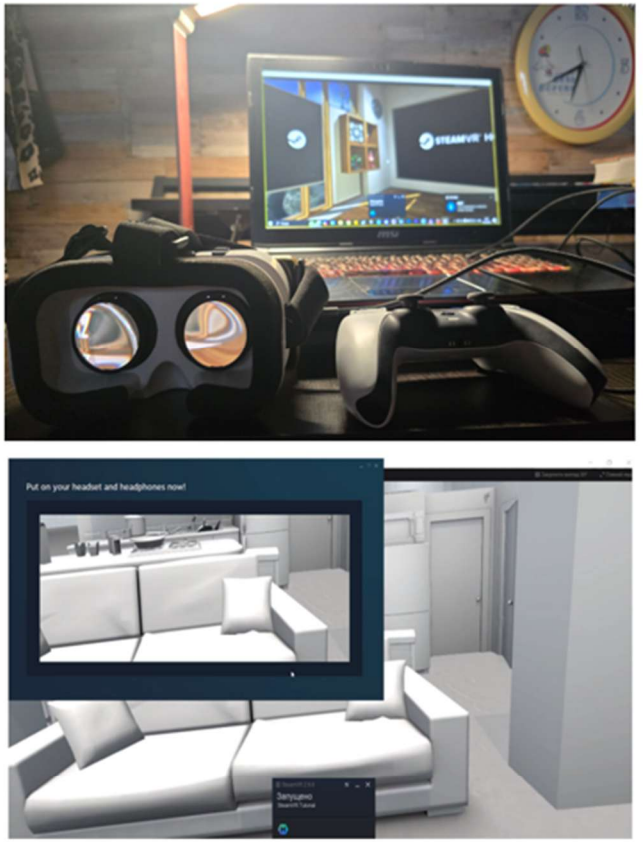


Рис. 2.19 – Екран ПК під час роботи Trinus VR Server

Технічне налаштування та інтерфейс Trinus VR

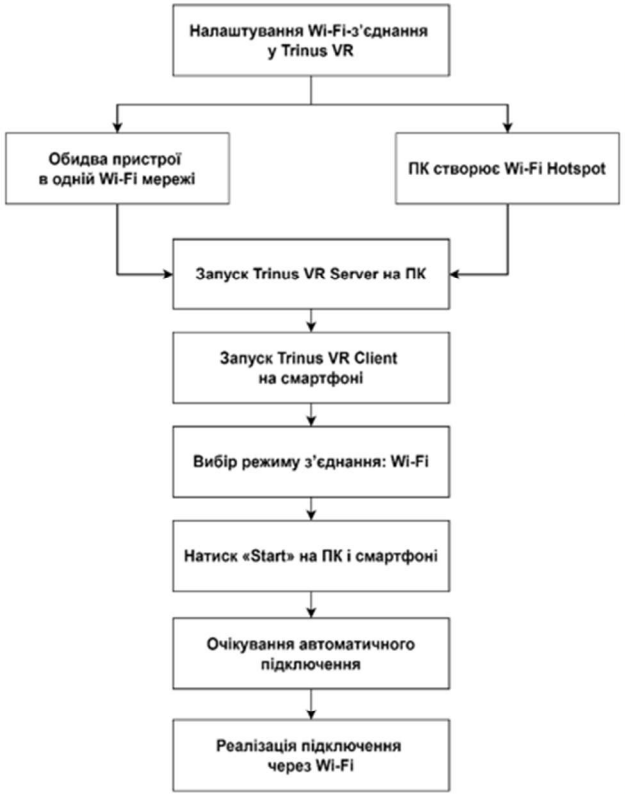


Рис. 2.14 – Алгоритм налаштування Wi-Fi-з'єднання

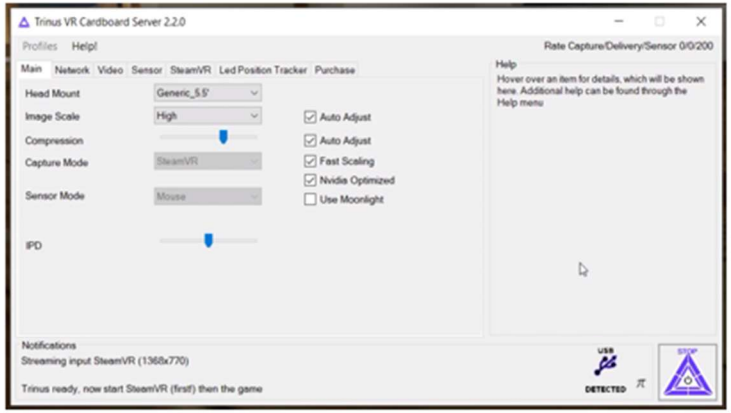


Рис. 2.11 – Інтерфейс Trinus VR Server на ПК

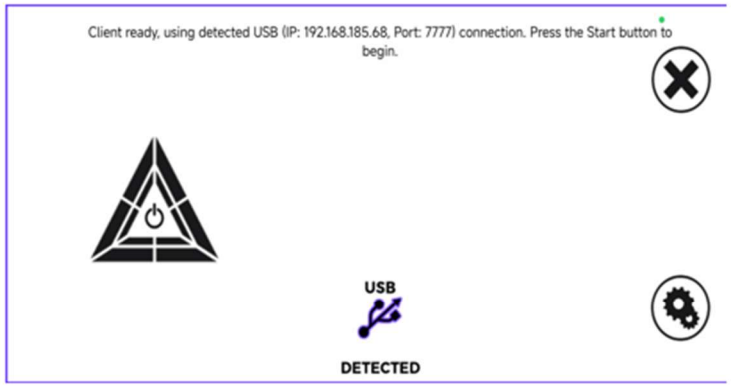


Рис. 2.12 – Інтерфейс Trinus VR Client на Android

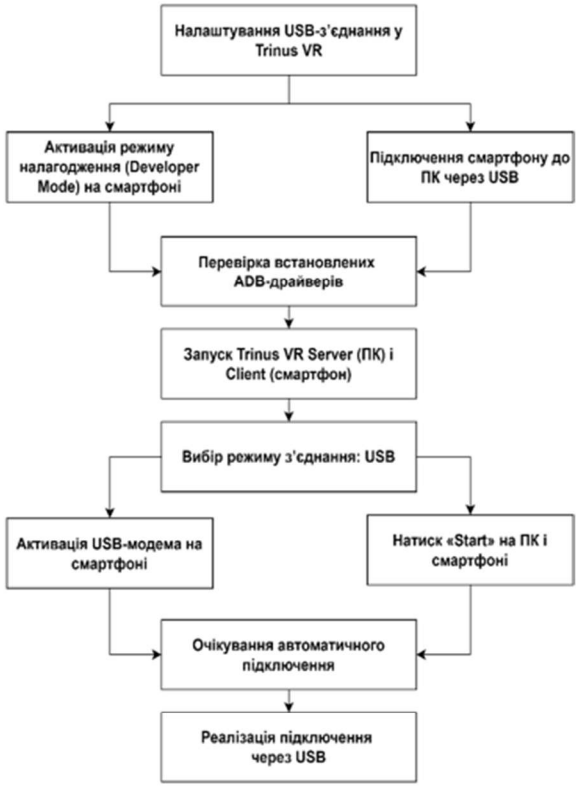


Рис. 2.16 – Алгоритм налаштування USB-з'єднання

Застосування VR у процесі дистанційної роботи



Рис. 2.10 – Приклад віртуального локального офісу з Trinus VR: BigScreen BETA (на базі SteamVR)

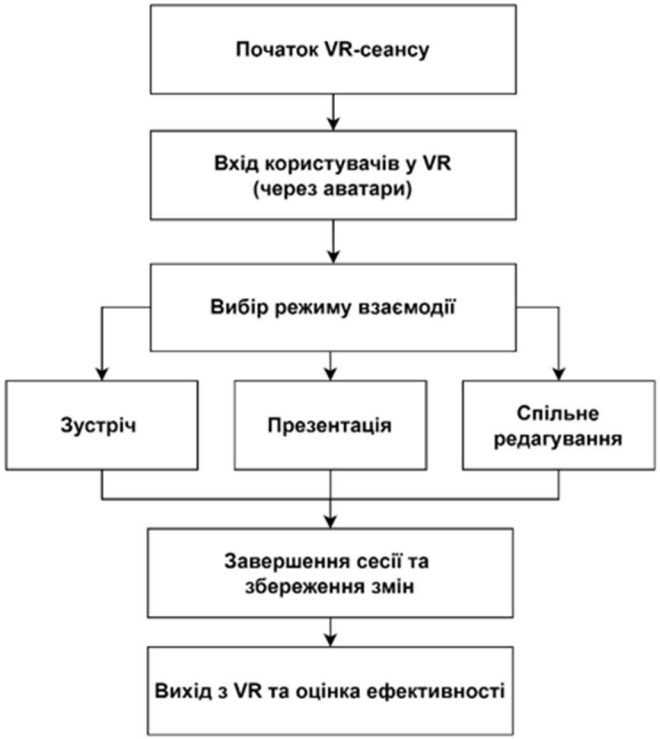


Рис. 2.7 – Типовий VR-сценарій: віртуальна зустріч

Проблеми та обмеження Trinus VR

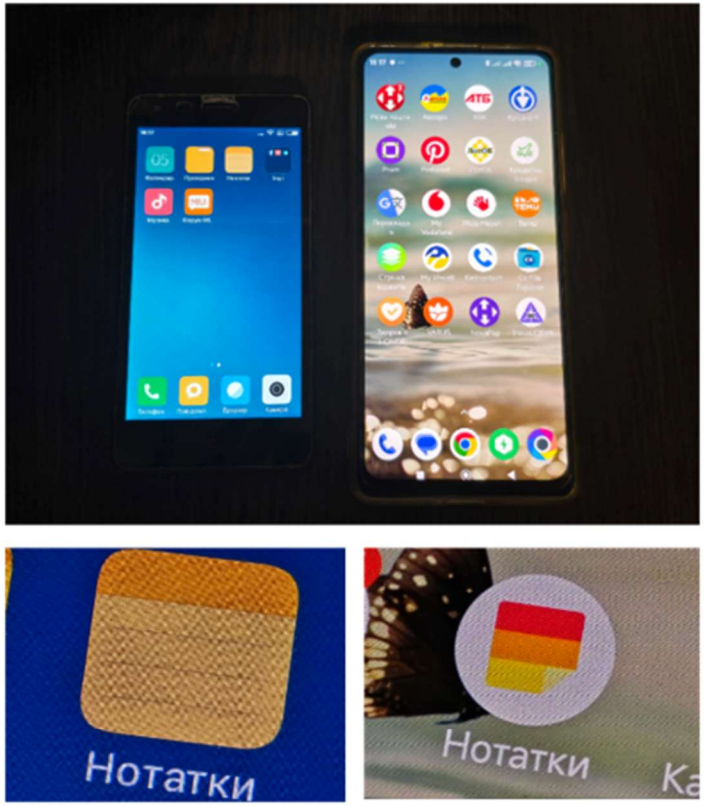


Рис. 2.5 – Різниця якості дисплея смартфона через покоління: Poco X5 Pro (2023 року) проти Xiaomi Redi 2 (2014 року)

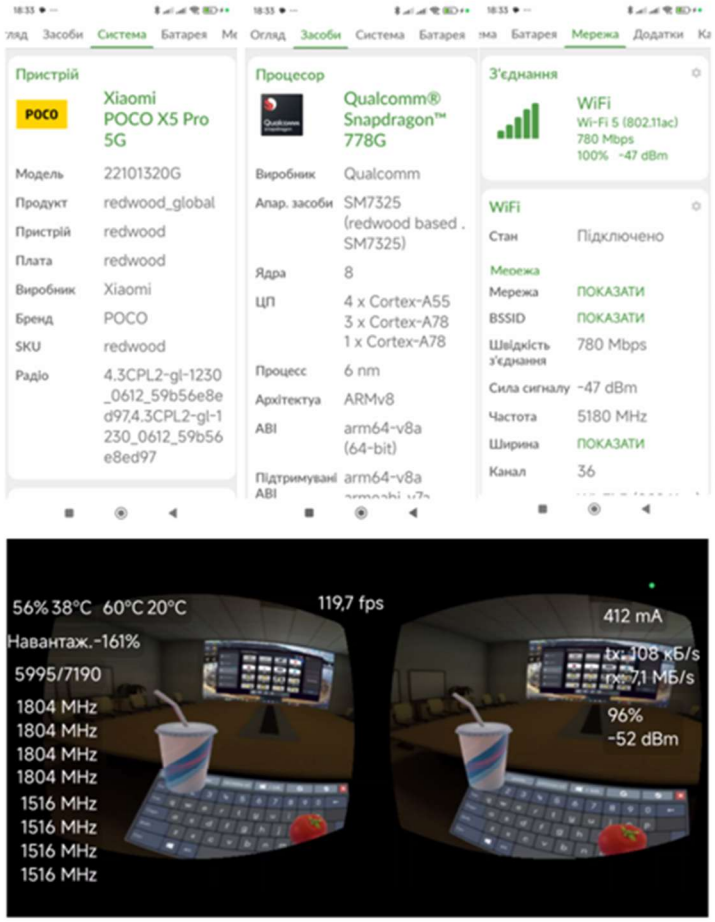


Рис. 3.5 – Вплив характеристик смартфона на якість VR

Метод покращення якості передачі зображення



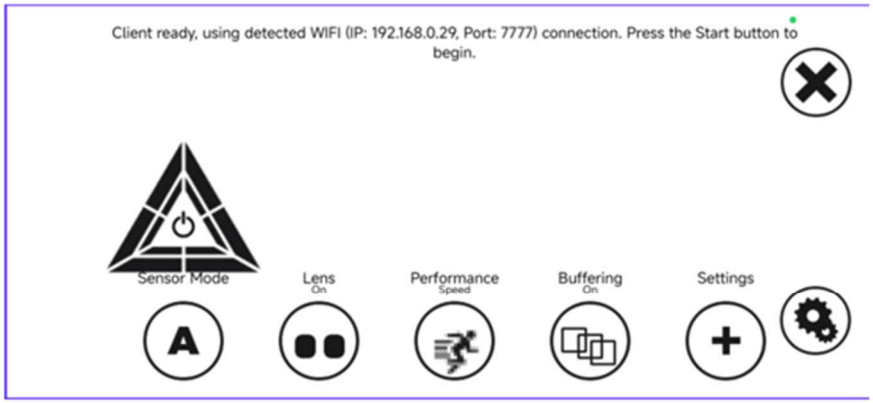


Рис. 3.2 – Зміна налаштувань системи для покращення якості зображення в Trinus VR



Рис. 3.1 – Метод покращення якості зображення в Trinus VR

Метод зменшення затримки сигналу між клієнтом та сервером Trinus VR



Рис. 3.3 – Метод зменшення затримки сигналу між клієнтом та сервером Trinus VR

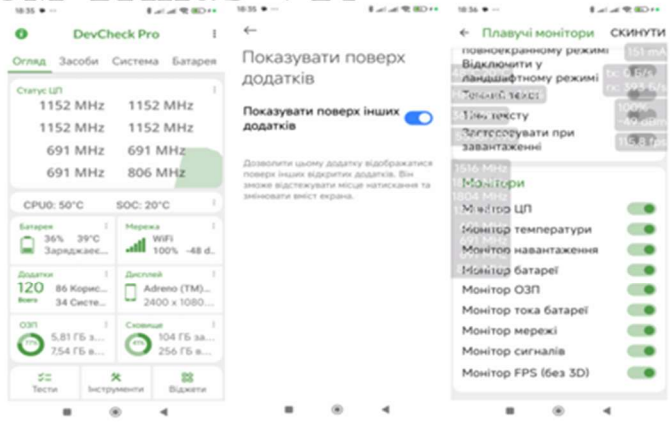


Рис. 3.4 – Увімкнення показників продуктивності через утиліту DevCheck



Рис. 2.6 – Використання ресурсів смартфона при виведенні VR-контенту

Кошторис реалізації та економічна доцільність

Табл. 3.1 – Діаграма економічної доцільності первинного використання мобільної системи Trinus VR

Критерій	Trinus VR + смартфон	Meta Quest 2 / 3	HTC Vive Pro	Pico 4
Тип системи	**Гібрид мобільної/стаціонарної**	Автономна з опц. ПК-підключення	Стаціонарна, тільки з ПК	Автономна з опц. ПК-підключення
Ціна (USD)	**5–50 (без смартфона)**	300 / 500	700–1500	400–600
Дисплей / Роздільність	**Залежить від смартфона**	LCD, 2064×2208 (на око)	OLED, 1440×1600 (на око)	LCD, 2160×2160 (на око)
Трекінг	**Гіроскоп, без 6DoF**	6DoF, без базових станцій	6DoF, з базовими станціями	6DoF, без базових станцій
Підключення до ПК	**USB / Wi-Fi (Trinus Bridge)**	USB / Air Link (Wi-Fi)	Лише через DisplayPort	USB / Wi-Fi
Контролери	**Bluetooth-геймпад**	Повноцінні 6DoF контролери	Повноцінні 6DoF контролери	Повноцінні 6DoF контролери
Платформи	**Android, Windows, Linux**	Android + ПК	ПК (SteamVR, VivePort)	Android + ПК
Призначення	**Ознайомче / демонстраційне**	Ігри, офіс, універсальне	Професійне, симулятори	Альтернатива, збалансоване

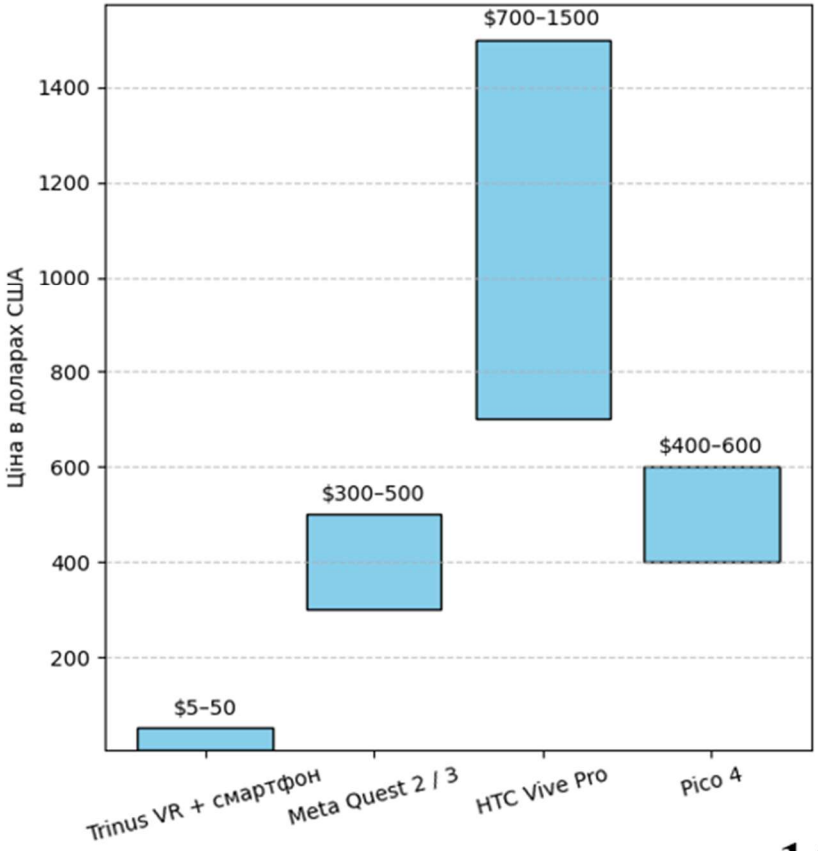


Рис. 3.8 – Діаграма економічної доцільності первинного використання мобільної системи Trinus VR

Висновки

Зібрана бюджетна VR-система на базі Trinus VR та смартфона підтвердила свою ефективність як мінімально необхідне рішення для створення ефекту присутності у віртуальному середовищі. Вона забезпечує передачу зображення з ПК у VR-форматі, підтримує базове керування гіроскопом смартфона і дозволяє проводити віртуальні зустрічі або демонстрації без значних фінансових витрат чи складного налаштування.

Попри спрощену архітектуру, система виявилась придатною для нетривалих VR-сесій, ознайомлення з технологією та початкових сценаріїв командної взаємодії. Її обмеження — як-от затримка при безпровідному з’єднанні, відсутність контролерів та залежність якості від смартфона — не заважають основному призначенню: доступному прототипуванню і тестуванню VR у навчальних або офісних умовах.

Публікації та апробація роботи

1. Клець О.В. Вивчення можливостей використання VR для віддаленої командної співпраці. «Проблеми комп'ютерної інженерії»: Науково-практ. конф., м.Київ, 3 грудня 2024 р. С.13-14.
2. Клець О.В., Зуб О.В. Застосування технологій віртуальної реальності для покращення віддаленої командної взаємодії. «Сучасний стан та перспективи розвитку IoT» : VI Науково-техн. конф., м.Київ, 15 квітня 2025 р. (подано до публікації).