

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет/(ННІ)

Інформаційних технологій

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету (Директор ННІ)

(назва факультету (ННІ))

Ігор Болбот
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ ” 2025_р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

(назва кафедри)

Белла Голуб
(підпис) (ім'я ПРІЗВИЩЕ)

“ ” 2025_р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

**на тему _____ ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
_СИСТЕМИ_ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ ДЛЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ
МАЙБУТНІХ ІНЖЕНЕРІВ**

Спеціальність

121 Інженерія програмного забезпечення

(код і найменування)

Освітня програма

Програмне забезпечення інформаційних систем

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

доц.к.ф.-м.н.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Віктор Кириченко
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Світлана Василюк-Зайцева
(ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Виконав

(підпис)

Влас Васянович
(ім'я ПРІЗВИЩЕ здобувача)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет (ННІ) інформаційних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри комп'ютерних наук
доцент, к.т.н. Голуб Б.

Л.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (ПІБ)
" 01 " листопада 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Васянович Влас Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 121 «Інженерія програмного забезпечення»

(код і назва)

Освітня програма Програмне забезпечення інформаційних систем

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Програмне забезпечення інтелектуальної системи віртуальної реальності для професійної підготовки майбутніх інженерів

затверджена наказом ректора НУБіП України від " 01 " листопада 2024р. №1963 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру 20.11.2025

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: результати наукових досліджень з тематики використання VR у вищій освіті

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз проблем професійної підготовки майбутніх інженерів, які можна вирішити шляхом використання VR-технологій.

2. Дослідження можливостей інтеграції інтелектуальних систем у VR-середовище для персоналізації навчання.

3. Розробка критеріїв оцінки ефективності використання інтелектуальної VR-системи у професійній підготовці інженерів.

Перелік графічного матеріалу (за потреби)

Дата видачі завдання " 01 " листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

Васильок-Зайцева С.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

Васянович В.В.

(підпис)

(прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ	10
1.1. Сучасний стан професійної підготовки майбутніх інженерів	10
1.2. Додатковий аналіз глобальних тенденцій інженерної освіти	11
1.3. Детальний аналіз апаратного забезпечення VR	12
1.3. Технології віртуальної реальності у сфері освіти	14
1.4. Інтелектуальні системи та їх застосування у навчанні	15
1.5. Аналіз предметної області	16
1.6 Детальний опис компонентів ВІ-ланцюжка	16
1.7. Розширений огляд інтелектуальних систем навчання	18
1.8. Розширений аналіз ризиків впровадження VR-технологій в освітній процес	19
1.9. Постановка завдання	22
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ VR-СИСТЕМИ	23
2.1. Використані методи моделювання	23
2.2. Діаграма прецедентів	24
2.3. Діаграма активностей	26
2.4. Діаграма класів	27
2.5. Архітектурна діаграма системи	29
2.6. Вимоги до системи	30
2.7. Технологічні засоби моделювання	30
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ ТА АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ	31
3.1. Загальна архітектура системи	31
3.2. Інформаційна модель системи	32
3.3. Зв'язки між таблицями	33
3.4. Організація процесу ETL	33
3.5. Генерація та нормалізація тестових даних	34
3.6. KPI-звіти у Visual Studio (SSRS)	36
3.7. Інтелектуальні алгоритми аналізу даних	38
3.8. Технологічна платформа	38
3.9. Формування ключових показників ефективності (KPI)	38
3.10. Візуалізація KPI у Power BI	40

	4
3.11. Інтеграція Power BI з SQL Server	40
3.12. Побудова OLAP-куба в SQL Server Analysis Services (SSAS)	41
3.13 Програмна реалізація системи	43
РОЗДІЛ 4. Результати дослідження та оцінка ефективності	45
4.1. Апаратні та програмні вимоги до функціонування системи	45
4.2. Тестування компонентів аналітичної системи	46
4.3. Експериментальна оцінка ефективності системи	49
4.4. Узагальнення результатів і висновки	51
4.5. Детальний план впровадження системи	52
4.6 Перспективи подальших досліджень	53
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- VR (Virtual Reality) — віртуальна реальність.
- AR (Augmented Reality) — доповнена реальність
- ITS (Intelligent Tutoring System) — інтелектуальна навчальна система.
- AI (Artificial Intelligence) — штучний інтелект.
- UML (Unified Modeling Language) — мова уніфікованого моделювання.
- BPMN (Business Process Model and Notation) — нотація моделювання бізнес-процесів.
- BI (Business Intelligence) — бізнес-аналітика, комплекс інструментів аналітичної обробки даних.
- ETL (Extract, Transform, Load) — процес вилучення, трансформації та завантаження даних.
- ELT (Extract, Load, Transform) — варіант процесу обробки даних з відкладеною трансформацією.
- OLTP (Online Transaction Processing) — система оперативної обробки транзакцій.
- OLAP (Online Analytical Processing) — система багатовимірного аналітичного аналізу даних.
- DWH (Data Warehouse) — сховище даних.
- SSIS (SQL Server Integration Services) — служба інтеграції SQL Server, використовується для ETL.
- SSAS (SQL Server Analysis Services) — служба аналітики SQL Server, використовується для побудови OLAP-кубів.
- SSRS (SQL Server Reporting Services) — служба створення звітів SQL Server.
- SSMS (SQL Server Management Studio) — середовище керування SQL Server.
- KPI (Key Performance Indicators) — ключові показники ефективності.
- MDX (Multidimensional Expressions) — мова запитів для OLAP-кубів.
- CSV (Comma-Separated Values) — текстовий формат збереження табличних даних.
- LMS (Learning Management System) — система управління навчанням.
- UI (User Interface) — інтерфейс користувача.
- SQL (Structured Query Language) — мова структурованих запитів до БД.
- DAX (Data Analysis Expressions) — формульна мова Power BI та SSAS Tabular.
- API (Application Programming Interface) — інтерфейс прикладного програмування.
- ISO (International Organization for Standardization) – Міжнародна організація зі стандартизації.

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) – Інститут інженерів з електротехніки та електроніки.

OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) – Організація економічного співробітництва та розвитку.

REST API (Representational State Transfer Application Programming Interface) – архітектурний стиль для створення веб-сервісів.

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасна світова економіка, що стрімко цифровізується, пред'являє підвищені вимоги до якості інженерної освіти. Випускники вишів мають не тільки володіти глибокими теоретичними знаннями, але й впевнено користуватися складним обладнанням, орієнтуватися в реальних виробничих процесах та швидко адаптуватися до нових технологій. Традиційна система підготовки, що ґрунтується на лекціях, лабораторних роботах з фізичним обладнанням та полігонних практиках, стикається з низкою системних обмежень: висока вартість та швидке моральне старіння техніки, обмежений доступ студентів до унікальних або небезпечних установок, ризик пошкодження дорогостоящего обладнання під час навчання.

У цьому контексті технологія віртуальної реальності (VR) виступає потужним каталізатором трансформації освітнього процесу. Вона дозволяє створювати безпечні, контрольовані та високоінтерактивні середовища для відпрацювання практичних навичок. Однак, сама по собі VR є лише інструментом. Її справжній потенціал розкривається при інтеграції з інтелектуальними системами, здатними аналізувати дії користувача, адаптувати складність завдань у реальному часі, будувати персоналізовані траєкторії навчання та об'єктивно оцінювати формування компетентностей. Таким чином, поєднання VR та штучного інтелекту (ШІ) створює новий якісний рівень освіти – інтелектуальне навчальне середовище, що робить тему даного дослідження вкрай актуальною.

Об'єкт дослідження – процес професійної підготовки майбутніх інженерів у вищих навчальних закладах, зокрема його практична складова, спрямована на формування вміннь та навичок роботи з технічними системами.

Предмет дослідження – методи, моделі та програмні засоби для створення та функціонування інтелектуальної системи віртуальної реальності, спрямованої на формування професійних компетентностей інженерів.

Мета роботи – на основі системного аналізу та моделювання обґрунтувати архітектуру та оцінити ефективність застосування інтелектуальної системи віртуальної реальності для підвищення якості професійної підготовки майбутніх інженерів.

Завдання роботи:

1. Провести аналіз сучасних підходів до використання VR у навчанні.
2. Дослідити можливості інтеграції інтелектуальних алгоритмів у VR-середовище.
3. Спроекувати архітектуру інтелектуальної VR-системи.
4. Розробити програмне забезпечення з навчальними сценаріями.
5. Виконати апробацію системи та оцінити її ефективність у навчальному процесі.

Методи дослідження.

У роботі використано комплекс методів:

- *Теоретичні:* системний аналіз для вивчення предметної області, порівняльний аналіз існуючих рішень та платформ.
- *Моделювання:* UML для проектування архітектури системи (діаграми прецедентів, активностей, класів, компонентів); інформаційне моделювання для проектування сховища даних.
- *Аналітичні:* методи Business Intelligence (ETL, OLAP, KPI) та алгоритми машинного навчання (кластеризація, асоціативні правила, дерева рішень) розглядалися як основа для аналітичного модуля.

Наукова новизна.

Вперше запропоновано інтеграцію VR-системи з інтелектуальними модулями персоналізації навчання, що дозволяє адаптувати навчальні сценарії під індивідуальні потреби студента.

Практичне значення.

Результати дослідження можуть бути використані:

- Вищими навчальними закладами технічного профілю як теоретична та методологічна основа для впровадження інтелектуальних VR-систем.
- Розробниками освітніх рішень для формування технічного завдання та архітектури майбутніх продуктів.
- Аналітиками освітніх процесів для розуміння потенціалу даних, що генеруються в VR-середовищах.

Апробація результатів.

Основні положення та результати дослідження планується представити у вигляді тез на студентських конференціях та у наукових публікаціях.

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить приблизно 60 сторінок.

РОЗДІЛ 1. СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1. Сучасний стан професійної підготовки майбутніх інженерів

Сучасна інженерна освіта перебуває у стані глибокої трансформації, зумовленої Четвертою промисловою революцією (Industry 4.0). Аналіз вимог роботодавців (за даними LinkedIn, HN.ua) показує, що окрім фундаментальних знань, від випускника очікують досвіду роботи з CAD/CAM/CAE системами, вміння працювати з великими даними (Big Data), основами кібербезпеки та, що найважливіше, сформованими «soft skills» – комунікацією, командною роботою та критичним мисленням. Традиційна модель «лекція-лабораторна» не в повній мірі відповідає цим вимогам.

Ключові проблеми традиційної підготовки:

- **Фінансові обмеження:** Закупівля та обслуговування сучасного обладнання (наприклад, промислових роботів, CNC-верстатів, енергетичних стендів) потребує значних капіталовкладень.
- **Фізичні та безпекові обмеження:** Багато реальних процесів (наприклад, налагодження високовольтного обладнання, тренування з ліквідації аварій на хімічних виробництвах) небезпечні для проведення учнями-початківцями.
- **Масштабованість та доступність:** Кількість студентів у групі часто перевищує кількість робочих місць на устаткуванні, що знижує індивідуальний навчальний час.
- **Відсутність гнучкості:** Складність швидкої зміни лабораторних стендів під нові технології, що призводить до відставання навчальних програм від реальних виробничих потреб.

Ці проблеми обумовлюють необхідність пошуку інноваційних шляхів, серед яких провідне місце посідають віртуальні симуляції та цифрові двійники.

1.2. Додатковий аналіз глобальних тенденцій інженерної освіти

Сучасна інженерна освіта формується під впливом глобальних трендів, серед яких провідне місце посідають цифровізація, інтернаціоналізація та орієнтація на практичні компетенції. Згідно з дослідженнями OECD та IEEE, до 2030 року понад 65% випускників інженерних спеціальностей працюватимуть у професіях, які сьогодні ще не існують. Це зумовлює потребу в гнучких навчальних програмах, здатних швидко адаптуватися до мінливих вимог ринку праці.

Критерій	Традиційні методи (лекції, лабораторні)	VR-орієнтована підготовка
Рівень засвоєння знань	20-30% (пасивне сприйняття)	до 75% (активна діяльність)
Безпека	Обмежена при роботі з небезпечним обладнанням	Абсолютна, можливість моделювання аварійних ситуацій
Вартість	Висока (обладнання, матеріали)	Значно нижча після початкових інвестицій
Масштабованість	Обмежена кількістю робочих місць	Необмежена, паралельна робота сотень студентів
Адаптивність	Низька, складно оновлювати матеріальну базу	Висока, швидке оновлення віртуальних сценаріїв
Збір даних	Фрагментарний (тести, екзамени)	Багатовимірний аналіз дій у реальному часі

Таб 1.1 Порівняльна характеристика методів підготовки інженерів

Вимоги Industry 4.0 до компетенцій інженерів:

Сучасний інженер повинен володіти не лише технічними знаннями, але й цифровими навичками, зокрема:

- Робота з цифровими двійниками (Digital Twins);
- Аналіз великих даних (Big Data) з виробничих систем;
- Програмування та кібербезпека промислових систем;
- Вміння працювати в віртуальних та доповнених середовищах.

Міжнародні стандарти освітніх технологій:

Впровадження VR у освіті регулюється низкою стандартів, серед яких:

- IEEE Standard for Learning Object Metadata (LOM) – забезпечує взаємодію між навчальними об'єктами;
- ISO/IEC 23894:2023 – керівні вказівки з інтеграції штучного інтелекту в освіту;
- SCORM (Sharable Content Object Reference Model) – стандарт для електронного навчального контенту.

1.3. Детальний аналіз апаратного забезпечення VR

Вибір апаратного забезпечення є критично важливим для створення ефективного навчального середовища. Основними критеріями вибору є: роздільна здатність, частота оновлення, тип трекінгу, автономність та вартість.

Модель	Роздільна здатність	Частота оновлення	Тип трекінгу	Автономність	Ціна (орієнтовно)	Переваги для освіти
Meta Quest 3	2064×2208 на око	90-120 Гц	Inside-out	Так (до 2 год)	\$\$\$	Висока мобільність, велика бібліотека додатків
HTC Vive Pro 2	2448×2448 на око	120 Гц	Lighthouse (зовнішній)	Ні	\$\$\$\$	Відмінна якість зображення, точність трекінгу
PICO Neo 3 Pro	1832×1920 на око	90 Гц	Inside-out	Так (до 2,5 год)	\$\$	Добра цінова політика, орієнтація на бізнес-сегмент
Valve Index	1440×1600 на око	144 Гц	Lighthouse (зовнішній)	Ні	\$\$\$\$	Плавність руху, найкращі контролери на ринку

Таб 1.2 Порівняльний аналіз сучасних VR-шоломів для освіти

Аналіз периферійних пристроїв:

Для реалізації повноцінного навчального процесу необхідні спеціалізовані контролери, які імітують інструменти та обладнання:

- **Тактильні рукавиці** – забезпечують зворотний зв'язок при взаємодії з віртуальними об'єктами;
- **Трекінг всієї тіла** – дозволяє аналізувати позу та рухи студента;

- **Спеціалізовані контролери** – імітують пульти управління, паяльники, хірургічні інструменти тощо.

Вимоги до комп'ютерного обладнання:

Для забезпечення плавної роботи VR-системи необхідні потужні графічні станції:

- **Відеокарта:** NVIDIA GeForce RTX 4070 / AMD Radeon RX 7800 XT або вище;
- **Процесор:** Intel Core i7-13700K / AMD Ryzen 7 7800X;
- **Оперативна пам'ять:** 32 ГБ DDR5;
- **Накопичувач:** SSD 1 ТБ.

1.4. Технології віртуальної реальності у сфері освіти

Віртуальна реальність – це технологія, що створює повністю імерсивне, інтерактивне тривимірне середовище, яке блокує зовнішній світ і заміщує його комп'ютерно-генерованим. У освіті VR дозволяє перенести будь-який об'єкт чи процес у клас. Переваги VR для інженерної освіти:

- **Безпека:** Можливість відпрацювати небезпечні сценарії без ризику для життя та здоров'я.
- **Візуалізація:** Можливість «зазирнути» всередину складних механізмів, спостерігати за потоком рідин або газів, візуалізувати абстрактні поняття (наприклад, електричні або магнітні поля).
- **Повторюваність:** Будь-який експеримент можна повторити необмежену кількість разів для закріплення навички.
- **Зниження вартості:** Віртуальне обладнання не зношується, не ламається і не потребує матеріальних витрат.

Огляд ринку VR-рішень для освіти:

- **Апаратне забезпечення:** Порівняння шоломів Oculus Quest 2/3 (автономність, доступність), HTC Vive Pro 2 (висока роздільна

здатність), Valve Index (краща відстеження рухів) та PICO Neo (бізнес-орієнтованість).

- **Програмне забезпечення:** Аналіз платформ для розробки (Unity 3D – універсальність, велика спільнота; Unreal Engine – висока якість графіки; WebXR – доступність через браузер).

Прогнози щодо зростання ринку VR в освіті до \$33.6 млрд до 2028 р. (MarketsandMarkets) підтверджують його динамічний розвиток.

1.5. Інтелектуальні системи та їх застосування у навчанні

Інтелектуальні навчальні системи (ITS) – це ПЗ, що використовує моделі та методи ШІ для персоналізації навчання. Відмінність ITS від звичайних комп'ютерних тренерів – здатність «розуміти» дії учня та адаптуватися до них.

- **Модель предметної області:** Знань, які необхідно навчити.
- **Модель учня:** Поточний стан знань, навичок та помилок учня.
- **Модель педагогічної стратегії:** Методів подачі матеріалу та реагування на дії учня.

Поєднання VR та ITS створює синергетичний ефект:

1. **Адаптивність:** Система аналізує час реакції, точність рухів, послідовність дій студента в VR і на основі цього динамічно змінює складність завдання, пропонує підказки або додаткові тренувальні модулі.
2. **Глибина аналітики:** VR дозволяє збирати не тільки результативні дані (пройдено/не пройдено), а й процесуальні (траєкторія руху, фокус погляду, біометричні показники), що дає значно глибше розуміння процесу навчання.

3. **Формування зворотного зв'язку:** Система може надавати детальний звіт не лише про результат, але й про процес виконання, вказуючи на конкретні помилки в діях.

1.6. Аналіз предметної області

У курсовій роботі вже було визначено основних користувачів системи (студент, викладач, адміністратор, аналітик) та завдання:

- аналіз прогресу студентів;
- оцінка ефективності інструкторів;
- моніторинг використання обладнання;
- вдосконалення навчальних програм.

Ця модель повністю відповідає предметній області магістерського дослідження й буде використана у подальших розділах.

1.7 Детальний опис компонентів ВІ-ланцюжка

Архітектура запропонованої аналітичної системи базується на принципах Business Intelligence (BI) та включає наступні взаємопов'язані компоненти:

- **Рівень джерел даних (Data Sources):**
 - **База даних VR-симулятора:** Основне джерело сирих даних, що містить таблиці Sessions, StudentActions, EquipmentLogs. Дані експортуються у форматі CSV через регулярні інтервали або по завершенню сесії.
 - **Зовнішні системи:** Система управління навчанням (LMS) для отримання даних про студентів та групи, кадрова система для даних про інструкторів.
 - **Файлові джерела:** Лог-файли VR-серверів, що містять технічні метрики (латентність, частота кадрів).
- **Рівень інтеграції та обробки даних (ETL/ELT):**
 - **SQL Server Integration Services (SSIS):** Виконує ключову роль у підготовці даних. Створено пакети, які автоматизують:

- **Extract:** Зчитування даних із CSV-файлів, REST API LMS та SQL-баз.
 - **Transform:** Очищення (видалення дублікатів, заповнення пропущених значень), трансформація (агрегація детальних дій у метрики на рівні сесії), об'єднання даних з різних джерел за ключовими полями (student_id, scenario_id).
 - **Load:** Інкрементальне завантаження підготовлених даних у сховище даних (DWH).
- **Рівень зберігання даних (Data Storage):**
 - **Сховище даних (DWH) на базі SQL Server:** Побудоване за схемою "зірка" (Star Schema) для оптимізації аналітичних запитів.
 - **Факт-таблиця Fact_Session:** Містить вимірювані показники (total_score, error_count, session_duration, completion_status).
 - **Таблиці вимірів (Dimensions):** Dim_Student (атрибути студента), Dim_Scenario (рівень складності, тип завдання), Dim_Time (дата, час, день тижня), Dim_Instructor.
 - **Рівень аналітики та звітності (Analytics & Reporting):**
 - **OLAP-куб в SSAS:** На основі сховища даних створено багатовимірну модель "VR_Performance_Cube". Куб дозволяє проводити швидкий аналіз за будь-яким напрямком (зрізом) – наприклад, успішність за групами, динаміка помилок за сценаріями.
 - **Звітність в SSRS:** Для стандартизованих, регулярних звітів (щомісячний звіт для деканату, індивідуальні звіти для студентів).
 - **Інтерактивні дашборди в Power BI:** Для гнучкого дослідницького аналізу викладачами та керівництвом.

Підключення до куба через режим Live Connection забезпечує високу продуктивність.

1.8. Розширений огляд інтелектуальних систем навчання

Інтелектуальні навчальні системи (ITS) представляють собою найбільш перспективний напрямок розвитку освітніх технологій. Від звичайних комп'ютерних тренерів їх відрізняє здатність адаптуватися до індивідуальних особливостей учня.

Архітектура ITS:

1. **Модель домену (Domain Model)** – містить структуровані знання з предметної області.
2. **Модель учня (Student Model)** – відображає поточний стан знань, навички, помилки та стиль навчання.
3. **Педагогічна модель (Tutoring Model)** – визначає стратегію навчання на основі аналізу моделі учня.
4. **Інтерфейс користувача (User Interface)** – забезпечує взаємодію між системою та студентом.

Методи адаптації контенту:

- **Алгоритми кластеризації (K-means, DBSCAN)** – для групового аналізу успішності;
- **Асоціативні правила (Apriori algorithm)** – для виявлення зв'язків між темами;
- **Дерева рішень (Decision Trees)** – для прогнозування успішності на основі історичних даних;
- **Рекомендаційні системи (Collaborative Filtering)** – для підбору індивідуальних завдань.

Case studies успішних впроваджень:

- **Carnegie Mellon's Cognitive Tutor** – система для навчання математики, що забезпечила підвищення успішності на 15-25%;
- **AutoTutor** – система для навчання фізики та комп'ютерних наук, що використовує природномовну комунікацію;

1.9. Розширений аналіз ризиків впровадження VR-технологій в освітній процес

Впровадження інноваційних VR-технологій у освітній процес вищого навчального закладу супроводжується комплексом ризиків, які потребують ретельного аналізу та розробки заходів щодо їх мінімізації. Систематизація цих ризиків дозволяє розробити ефективну стратегію впровадження та уникнути потенційних негативних наслідків.

1. Технічні ризики

- **Кіберхвороба (VR sickness):** Виникає внаслідок розбіжності між візуальними образами, що сприймаються очами, та відчуттями вестибулярного апарату. Проява: запаморочення, нудота, дезорієнтація.
Наслідки: Зниження ефективності навчання, формування негативного ставлення до технології.
Запобігання: Оптимізація продуктивності (мінімум 90 FPS), зниження затримок (motion-to-photon latency < 20 мс), використання стабільних точок відліку в віртуальному середовищі, поступове звикання до VR з коротких сесій.
- **Технічні збої та нестабільність роботи:** Програмні помилки, конфлікти драйверів, перегрів обладнання, розрядження акумуляторів автономних шоломів.
Наслідки: Переривання навчального процесу, втрата даних про результати сесії, фрустрація користувачів.

Запобігання: Регулярне оновлення ПЗ, наявність резервного обладнання, чіткі інструкції з технічного обслуговування, використання перевірених апаратних конфігурацій.

- **Апаратне старіння та швидка моральна застарілість:** VR-ринок стрімко розвивається, моделі шоломів та контролерів оновлюються щодня 2-3 роки.

Наслідки: Впроваджені рішення можуть швидко втратити актуальність, виникають проблеми з сумісністю, з'являються нові можливості, недоступні на старому обладнанні.

Запобігання: Формування стратегії оновлення парку обладнання, використання кросплатформових інструментів розробки, орієнтація на модульні архітектури.

2. Психологічні та фізіологічні ризики

- **Психологічне перевантаження та інформаційна пересиченість:** Інтенсивна імерсивна сесія може спричинити стрес, тривожність, особливо у студентів, схильних до неї.

Наслідки: Емоційне вигорання, зниження мотивації до навчання.

Запобігання: Дозування тривалості сесій (рекомендовано 20-30 хв), обов'язкові перерви, моніторинг біометричних показників для виявлення стресу, створення позитивного та підтримуючого середовища.

- **Дезорієнтація та порушення просторового сприйняття:** Після тривалого перебування у VR може спостерігатися тимчасова дезорієнтація при поверненні до реального світу.

Наслідки: Дискомфорт, потенційний ризик травматизму при негайному виконанні точних дій з реальним обладнанням.

Запобігання: Проведення "адаптаційної паузи" 5-10 хвилин після сесії, заборона на роботу з реальним обладнанням відразу після VR-тренування.

- **Формування психологічної залежності:** Високий рівень занурення та можливість створення ідеальних віртуальних світів може спричинити прагнення до втечі від реальності.

Наслідки: Соціальна ізоляція, зниження академічної успішності в інших дисциплінах.

Запобігання: Інтеграція VR як доповнення, а не заміни реального спілкування та навчання, контроль часу використання.

3. Організаційні та педагогічні ризики

- **Відсутність методичних розробок:** Недостатня кількість якісних, педагогічно вивірених VR-сценаріїв, що відповідають навчальним програмам.

Наслідки: Використання VR як "дорогої іграшки", а не ефективного інструменту навчання.

Запобігання: Інвестиції в розробку власного контенту, створення методичних комісій, співпраця з іншими університетами для обміну сценаріями.

- **Складність інтеграції в навчальний план:** VR-сесії потребують часу на підготовку, проведення та аналіз, що може вступати в конфлікт з існуючим розкладом.

Наслідки: Перевантаження навчального плану, неефективне використання часу.

Запобігання: Редизайн навчальних програм з урахуванням VR-модулів, створення гнучкого розкладу.

4. Економічні ризики

- **Висока початкова вартість:** Затрати на закупівлю VR-шоломів, потужних комп'ютерів, розробку або покупку ліцензій на програмне забезпечення та навчальні сценарії.

Наслідки: Велике фінансове навантаження на бюджет ЗВО, неможливість швидкого окуплення.

Запобігання: Поетапне впровадження, старт з пілотних проектів, пошук грантів, розгляд оренди обладнання (Hardware-as-a-Service).

- **Приховані експлуатаційні витрати:** Витрати на технічну підтримку, оновлення ПЗ, ремонт та заміну пошкодженого обладнання, оплати електроенергії.

Наслідки: Непередбачені фінансові витрати, що перевищують початкові розрахунки.

Запобігання: Реальна оцінка TCO (Total Cost of Ownership), формування резервного фонду.

Успішне впровадження VR-технологій вимагає комплексного підходу, що включає не лише технічну підготовку, але й ретельне планування щодо усунення психологічних, організаційних та економічних ризиків. Створення детального плану впровадження з урахуванням усіх перелічених факторів є запорукою реалізації повного потенціалу віртуальної реальності в інженерній освіті.

1.9. Постановка завдання

На основі проведеного аналізу сформульовано завдання системи:

1. Автоматизований збір даних про навчальні сесії у VR.
2. Створення сховища даних для збереження та інтеграції інформації.
3. Розробка механізмів ETL (Extract, Transform, Load) для обробки даних.
4. Побудова OLAP-кубів для багатовимірного аналізу.
5. Розрахунок KPI для оцінки ефективності підготовки.
6. Формування звітів для різних категорій користувачів (студент, викладач, адміністратор, аналітик).

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ VR-СИСТЕМИ

2.1. Використані методи моделювання

Для опису функціональних, поведінкових та структурних характеристик інтелектуальної системи віртуальної реальності використано мову **UML (Unified Modeling Language)**. UML є стандартом, що забезпечує уніфіковані підходи до моделювання програмних систем на різних етапах життєвого циклу.

Основні причини вибору UML:

- широке використання в індустрії та підтримка різними CASE-засобами;
- можливість опису як функціональних вимог, так і внутрішньої структури системи;
- наочність і зручність для розробників, аналітиків та користувачів.

У роботі застосовано такі види діаграм:

- **діаграма прецедентів** – для відображення функціональних вимог та сценаріїв взаємодії користувачів із системою;
- **діаграма активностей** – для опису поведінки системи під час виконання бізнес-процесів;
- **діаграма класів** – для моделювання структури системи та інформаційного забезпечення;
- **архітектурна діаграма** – для представлення загальної топології та потоків даних.

Окрім UML, для опису бізнес-процесів взаємодії викладача з системою було використано нотацію BPMN (Business Process Model and Notation). Це дозволило чітко визначити відповідальних та точки прийняття рішень.

2.2. Діаграма прецедентів

Діаграма прецедентів відображає взаємодію між користувачами системи та її функціональними можливостями.

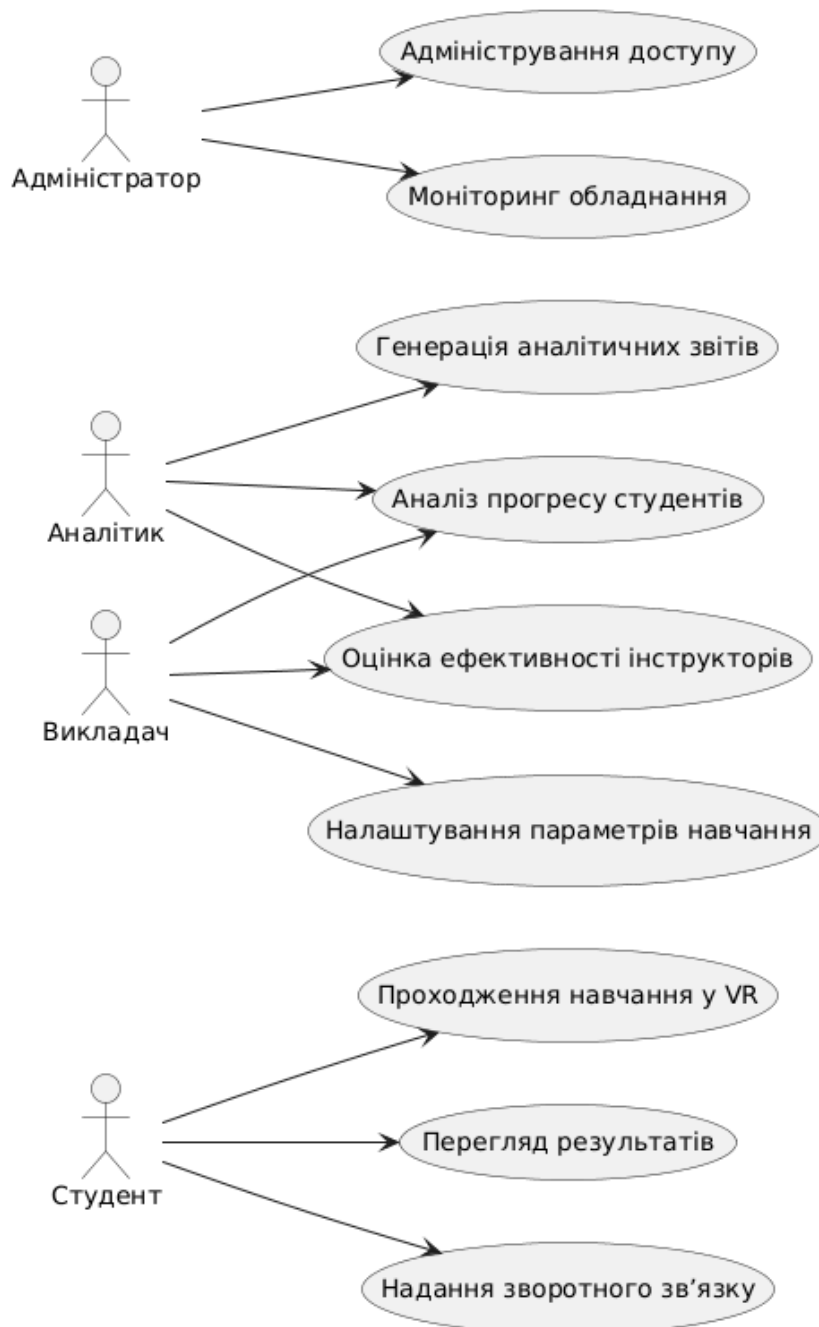


Рис 2.1 Діаграма прецедентів

Актори системи:

- Студент – проходить навчальні VR-сценарії, отримує зворотний зв'язок, переглядає власні результати.

- Викладач – створює та редагує сценарії, контролює процес навчання, аналізує успішність студентів.
- Адміністратор – відповідає за технічну підтримку, налаштування системи, управління користувачами.
- Аналітик – здійснює глибинний аналіз даних, формує звіти для керівництва.

Основні прецеденти:

- «Запуск VR-сценарію» (студент);
- «Отримання звіту про результати» (студент, викладач);
- «Редагування навчального сценарію» (викладач);
- «Формування КРІ-звітів» (аналітик);
- «Адміністрування системи» (адміністратор).

Таким чином, діаграма прецедентів визначає коло функцій системи та вимоги до її програмної реалізації.

2.3. Діаграма активностей

Діаграма активностей (рис. 2.2) деталізує процес проходження сесії та описує послідовність дій студента під час проходження навчання у VR-середовищі.

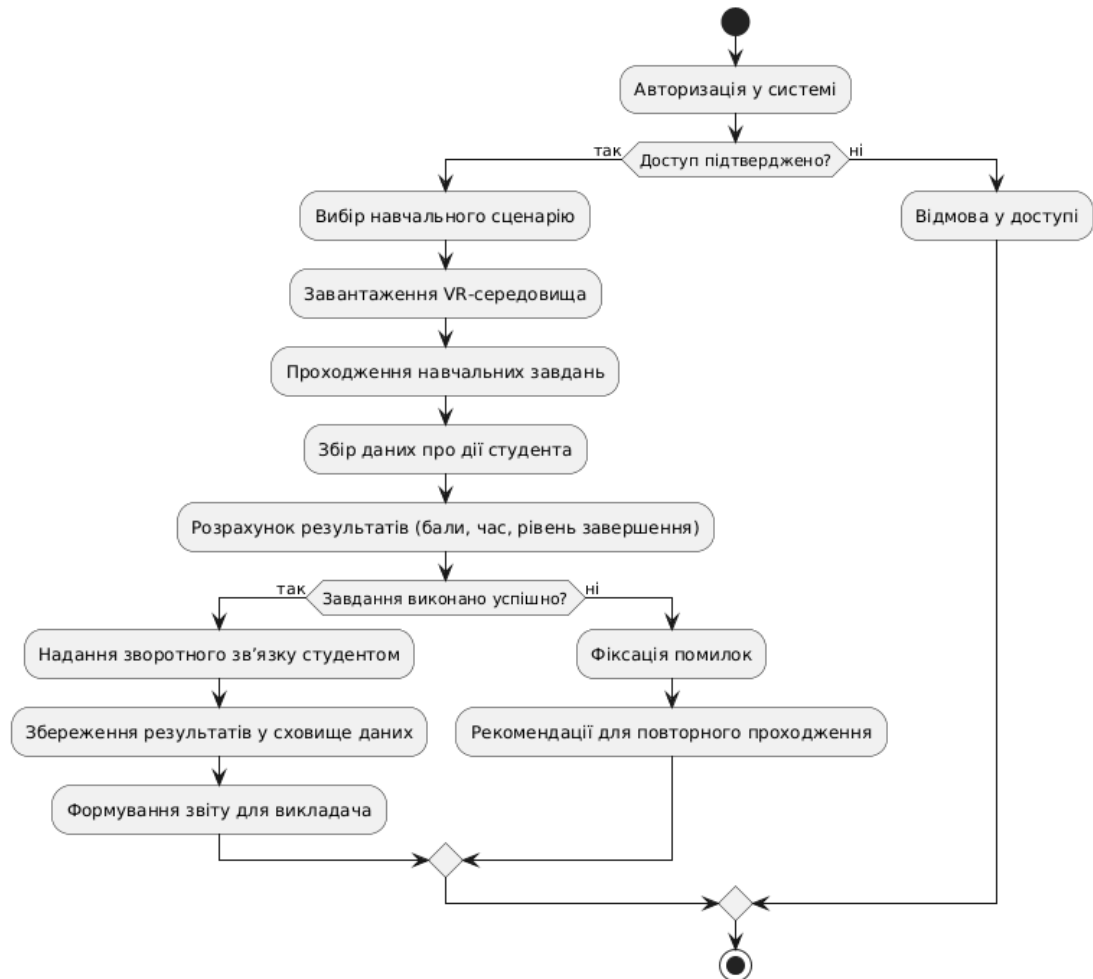


Рис 2.2 Діаграма активностей

Приклад бізнес-процесу «Проходження VR-сценарію»:

1. Студент авторизується у системі.
2. Обирає навчальний сценарій.
3. Система завантажує VR-середовище.
4. Студент виконує завдання.
5. Система реєструє дії та результати.
6. Дані передаються у сховище.
7. Формується звіт про виконання.
8. Викладач отримує доступ до результатів.

У діаграмі активностей відображаються умовні гілки:

- «успішне виконання» → система переходить до формування позитивного звіту;
- «помилка» → студент отримує підказку та можливість повторити завдання.

2.4. Діаграма класів

Для опису інформаційного забезпечення системи використано діаграму класів (рис. 2.3). Вона відображає сутності та зв'язки:

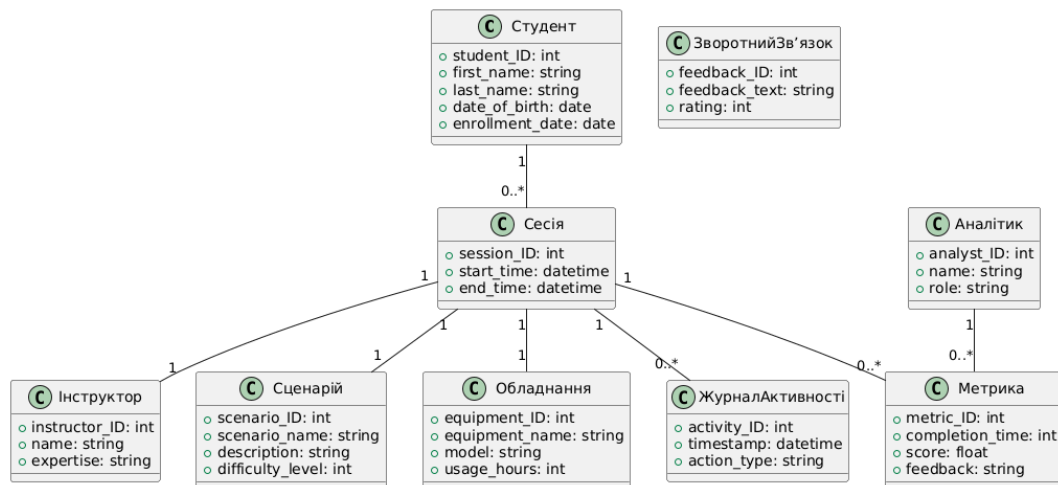


Рис 2.3 Діаграма класів

- **Студент** – користувач, що проходить навчання.
- **Інструктор** – супроводжує навчальний процес.
- **Сценарій** – набір завдань.
- **Сесія** – факт навчання у VR.
- **Обладнання** – VR-пристрої.
- **Метрика** – показники виконання.
- **Зворотний зв'язок** – оцінка студента.
- **Журнал активності** – лог подій.
- **Аналітик** – користувач, який працює зі статистикою.

Дана модель лягає в основу структури бази даних і реалізації сховища даних.

2.5. Архітектурна діаграма системи

Архітектурна діаграма (рис. 2.4) демонструє загальну структуру системи:

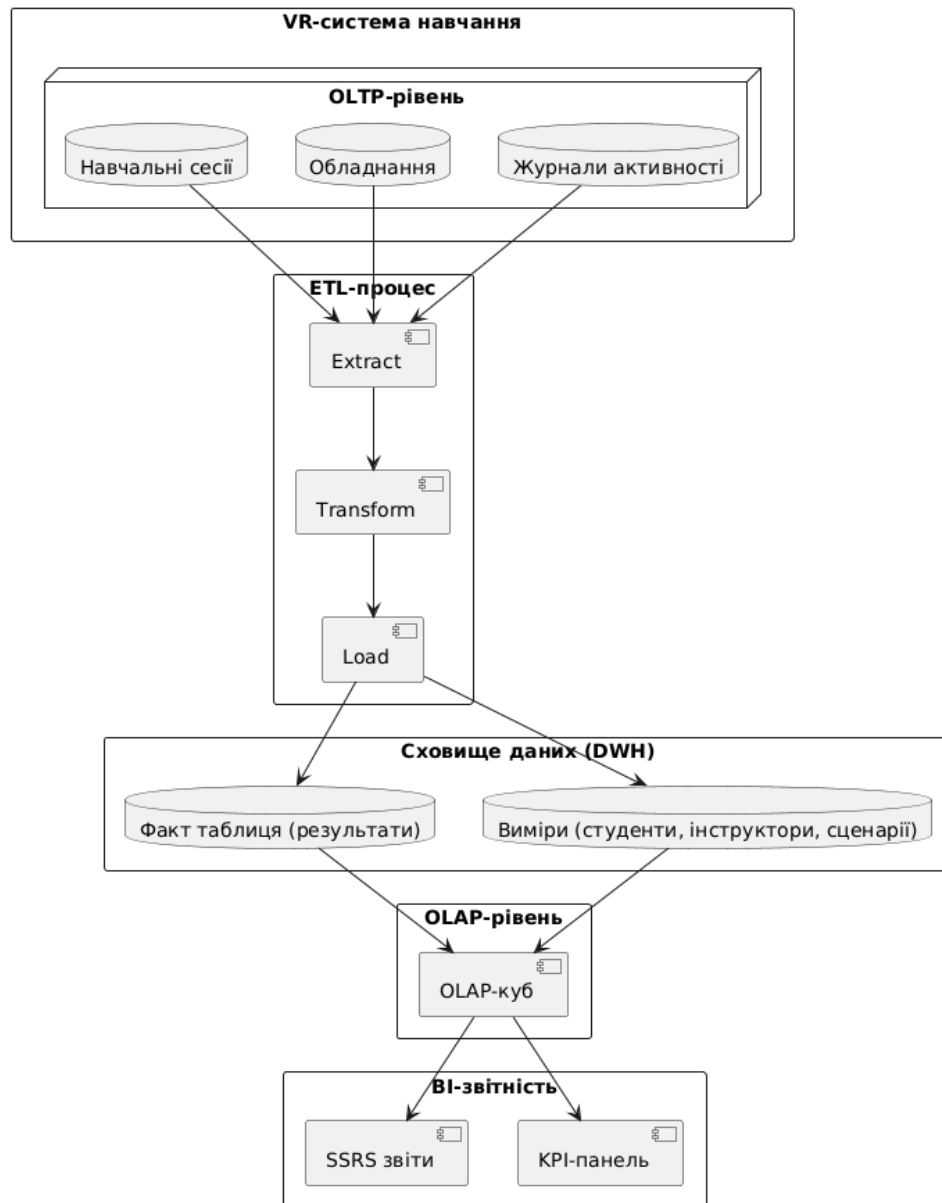


Рис 2.4 Архітектурна діаграма

- **OLTP-рівень** – оперативні бази даних (сесії, обладнання, журнали).

- **ETL-рівень** – процеси вилучення, трансформації та завантаження даних.
- **DWH** – сховище даних (факт-таблиця + таблиці вимірів).
- **OLAP-рівень** – побудова багатовимірних кубів.
- **ВІ-звітність** – візуалізація даних у вигляді звітів і панелей КРІ.

Архітектура системи відповідає принципам побудови сучасних аналітичних систем і забезпечує гнучкість та масштабованість.

2.6. Вимоги до системи

На основі проведеного аналізу сформульовано вимоги:

Функціональні вимоги:

- авторизація та управління доступом;
- проходження навчання у VR;
- автоматизоване збирання результатів;
- збереження та обробка даних у DWH;
- багатовимірний аналіз у OLAP-кубах;
- формування звітів і панелей КРІ.

Нефункціональні вимоги:

- сумісність із сучасним VR-обладнанням;
- масштабованість системи при збільшенні кількості студентів;
- захист даних і забезпечення конфіденційності;
- зручний інтерфейс користувача;
- інтеграція з існуючими освітніми платформами.

2.7. Технологічні засоби моделювання

У процесі моделювання було використано такі інструменти:

- **PlantUML** та **draw.io** – для створення UML-діаграм;
- **MS SQL Server** – для реалізації сховища даних;
- **SSIS (SQL Server Integration Services)** – для процесів ETL;

- **SSRS (SQL Server Reporting Services)** – для формування звітів і панелей KPI.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ ТА АНАЛІТИЧНИЙ АНАЛІЗ

3.1. Загальна архітектура системи

Інтелектуальна система віртуальної реальності призначена для організації, моніторингу та аналітики процесу професійної підготовки інженерів із використанням VR-технологій.

Архітектура системи побудована за принципом **багаторівневої клієнт-серверної моделі**, яка включає:

- **Рівень збирання даних (VR-клієнти)** — пристрої шоломів віртуальної реальності, що генерують інформацію про навчальні сесії, показники користувачів, тривалість і успішність проходження сценаріїв.
- **Серверний рівень (SQL Server)** — база даних, у якій зберігаються всі показники користувачів, сесій, сценаріїв, інструкторів тощо.
- **Аналітичний рівень (SSRS, Power BI)** — модулі для обробки й візуалізації даних, формування KPI, динамічних звітів і дашбордів для керівництва.
- **Інтерфейс управління (Desktop/Web UI)** — доступ до статистики та керування навчальними процесами.

3.2. Інформаційна модель системи

Для зберігання даних системи створено реляційну базу VR_Training_DB у середовищі SQL Server Management Studio.

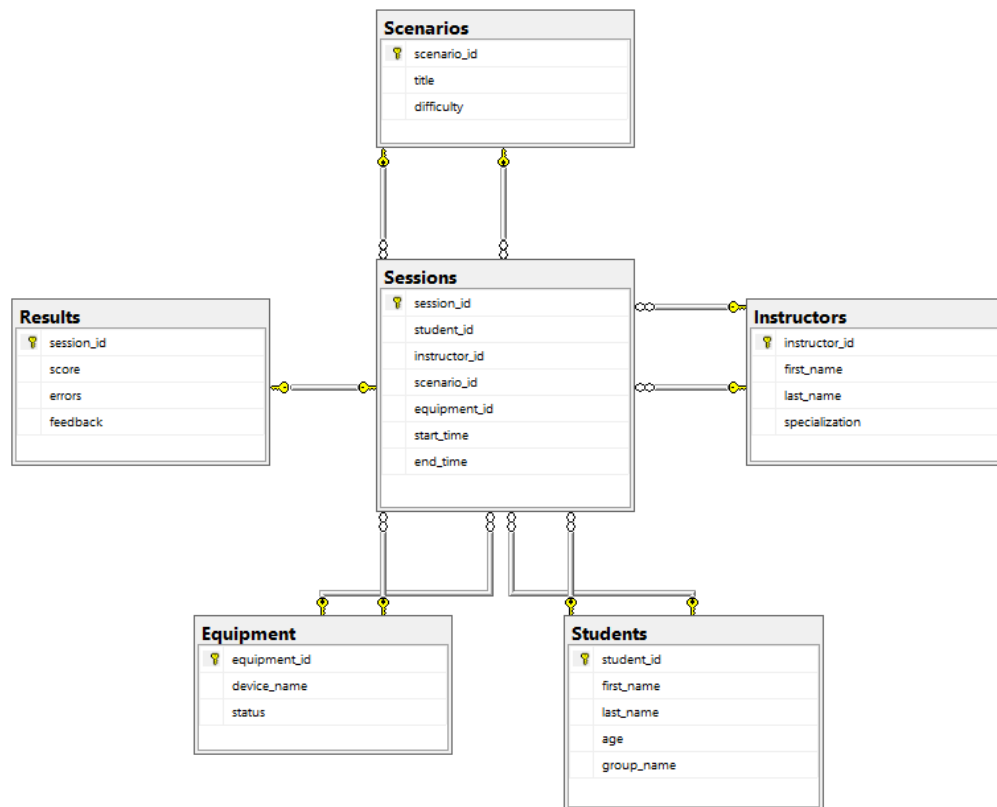


Рис 3.1 Реляційна модель БД

- Students — зберігає дані студентів (ПІБ, група, вік);
- Instructors — містить відомості про викладачів;
- Scenarios — описує навчальні сценарії (назва, складність);
- Sessions — реєструє інформацію про кожну навчальну сесію (дата, час початку та завершення, студент, інструктор, сценарій);
- Results — фіксує результати проходження (оцінка, кількість помилок).

Факт-таблиці (Facts):

- Результати навчальних сесій (бал, тривалість, кількість помилок, завершення сценарію).
- Використання обладнання (кількість годин, стан пристрою).
- Журнали активності (лог подій, дії користувачів).

Така структура відповідає архітектурі «зірки» (Star Schema), яка є оптимальною для побудови OLAP-кубів.

3.3. Зв'язки між таблицями

База даних побудована на основі **реляційних зв'язків** типу “*один-до-багатьох*”:

- один **інструктор** може проводити багато сесій;
- один **студент** бере участь у багатьох сесіях;
- один **сценарій** може виконуватись багаторазово різними студентами;
- кожна **сесія** має один запис у таблиці Results.

Ці зв'язки дозволяють формувати багатовимірні аналітичні моделі.

3.4. Організація процесу ETL

Кожен етап трансформації у SSIS включав такі операції: - перевірку цілісності даних; - приведення дат до стандартного формату; - перетворення текстових значень у числові; - об'єднання таблиць через Lookup; - очищення від помилкових записів; - завантаження даних у факт-таблицю.

Цей процес є ключовим для підготовки даних до побудови OLAP-куба.

Процес ETL (Extract – Transform – Load) складається з трьох етапів:

1. Витягування даних (Extract):
 - отримання даних із журналів VR-сесій;
 - завантаження інформації про студентів, інструкторів, сценарії;
 - збір показників з обладнання.
2. Трансформація (Transform):
 - очищення даних від дублікатів та помилок;
 - приведення даних до єдиного формату;

- інтеграція з довідниками.

3. Завантаження (Load):

- завантаження у сховище даних;
- оновлення факт-таблиць і таблиць вимірів;
- інкрементальні оновлення для OLAP-кубів.

Використання SQL Server Integration Services (SSIS) дозволяє автоматизувати цей процес і зменшити кількість помилок.

3.5. Генерація та нормалізація тестових даних

Для моделювання роботи системи та побудови KPI використано згенеровані тестові дані.

Здійснено:

- випадковий розподіл оцінок (від 55 до 100);
- логічну залежність кількості помилок (0–6) від рівня оцінки;
- варіації за інструкторами, сценаріями, групами;
- генерацію дат сесій (2023–2025) у полях start_time і end_time.

Фрагмент коду оновлення даних:

```
UPDATE r
SET
    r.score =
        CASE
            WHEN i.instructor_id % 4 = 0 THEN FLOOR(60 +
(RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 35))
            WHEN i.instructor_id % 4 = 1 THEN FLOOR(70 +
(RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 25))
            WHEN i.instructor_id % 4 = 2 THEN FLOOR(75 +
(RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 20))
            ELSE FLOOR(80 + (RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 20))
        END
```

```

+ CASE WHEN sc.difficulty = 'High' THEN -5 WHEN sc.difficulty =
'Extreme' THEN -10 ELSE 0 END
+ CASE WHEN st.group_name IN ('G1','G2') THEN -3 WHEN
st.group_name IN ('G9','G10') THEN +3 ELSE 0 END,
r.errors =
CASE
WHEN r.score >= 90 THEN
FLOOR(RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 1)
WHEN r.score >= 80 THEN FLOOR(1 +
RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 2)
WHEN r.score >= 70 THEN FLOOR(2 +
RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 3)
ELSE FLOOR(3 + RAND(CHECKSUM(NEWID())) * 3)
END
FROM Results r
JOIN Sessions s ON r.session_id = s.session_id
JOIN Students st ON s.student_id = st.student_id
JOIN Instructors i ON s.instructor_id = i.instructor_id
JOIN Scenarios sc ON s.scenario_id = sc.scenario_id;

```

Результати після оновлення показують реалістичний розкид значень:

- оцінки: 60–100;
- помилки: 0–6;
- успішність: 20–90% залежно від групи та сценарію.

3.6. KPI-звіти у Visual Studio (SSRS)

Для аналізу результатів підготовки у середовищі **SQL Server Reporting Services (SSRS)** створено серію KPI-звітів:

1. **Average Equipment Time Usage** — середній час використання обладнання;

Equipment	Sessions Used	Average Duration min	Current Status
VR-Headset-8	5062	24	In Use
VR-Headset-10	5057	25	Available
VR-Headset-6	5037	25	Available
VR-Headset-9	5024	24	Available
VR-Headset-7	5021	24	Available
VR-Headset-5	4986	25	In Use
VR-Headset-3	4980	24	Maintenance
VR-Headset-1	4959	25	Available
VR-Headset-2	4954	25	In Use
VR-Headset-4	4920	24	Available

Середній час використання

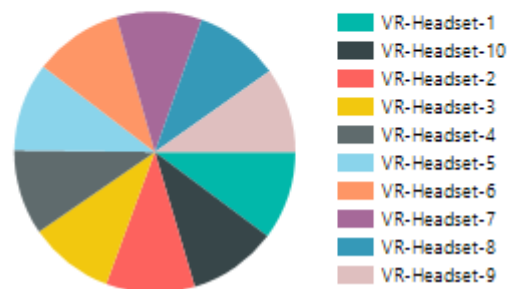


Рис 3.2 KPI середнього часу використання обладнання

2. Error Rate by Scenario — середня кількість помилок у сценаріях;

Scenario	Difficulty	Total Sessions	Average Score	Average Errors
Programming basics	Low	5101	83	1
Thermodynamics lab	Low	4928	83	1
CAD modeling	Medium	4992	83	1
Electrical circuits	Medium	4976	83	1
Safety training	Medium	4886	83	1
Hydraulics simulation	High	4894	78	1
Machine assembly	High	5070	78	1
Network setup	High	5032	78	1
Civil structures	Extreme	5080	73	1
Control systems	Extreme	5041	73	1

Результативність сценаріїв навчання

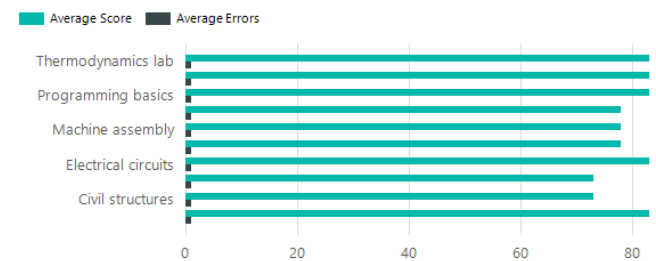


Рис 3.3 KPI середньої кількості помилок по сценаріям

3. Performance by Group — порівняння успішності навчальних груп.

Група	Середня оцінка	Середня к-ть помилок	Кількість студентів
G9	82	1	990
G10	82	1	994
G4	79	1	1002
G7	79	1	968
G5	79	1	1030
G8	79	1	1025
G3	79	1	976
G6	79	1	1053
G2	76	1	982
G1	76	1	980

Середній бал

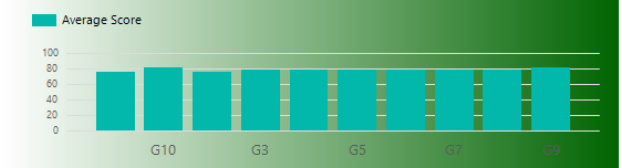


Рис 3.4 Порівняння успішності груп

Функції:

- формування стандартних звітів (успішність студентів, ефективність інструкторів, стан обладнання);
- інтерактивні панелі KPI для керівництва;
- експорт у формати PDF, Excel, PowerPoint;

- публікація звітів через веб-інтерфейс.

3.7. Інтелектуальні алгоритми аналізу даних

Для підтримки прийняття рішень використано методи Data Mining:

- Кластеризація (K-means): розподіл студентів на групи за рівнем знань.
- Асоціативні правила: виявлення закономірностей між сценаріями (наприклад, якщо студент успішно виконав «Сценарій 1», то з великою ймовірністю виконає «Сценарій 2»).
- Прогнозування (Decision Trees): оцінка ймовірності успішного завершення сценарію залежно від часу тренування та кількості попередніх спроб.

Це дозволяє не лише аналізувати минулі результати, але й прогнозувати майбутні успіхи студентів.

3.8. Технологічна платформа

Система базується на таких інструментах і технологіях:

- MS SQL Server – OLTP та DWH;
- SSIS – ETL-процеси;
- SSAS – OLAP-моделювання;
- SSRS, Power BI – звітність і KPI;

Це забезпечує комплексність, масштабованість і можливість інтеграції з іншими освітніми платформами.

3.9. Формування ключових показників ефективності (КПІ)

Для оцінки результатів навчання у VR-середовищі було визначено систему ключових показників ефективності (Key Performance Indicators, КПІ), що відображають якість засвоєння матеріалу та продуктивність студентів.

Основні КПІ:

Показник	Формула	Інтерпретація
Average Score	AVG(score)	середня оцінка студентів
Average Errors	AVG(errors)	середня кількість помилок під час сесії
Success Rate %	$(\text{кількість оцінок} \geq 85) / \text{загальна кількість} * 100$	частка студентів, які успішно пройшли тренування
Sessions Count	COUNT(session_id)	кількість проведених сесій

Таб 3.1 Приклади КПІ

Приклад SQL-запиту для розрахунку КПІ:

```
SELECT
    s.group_name,
    ROUND(AVG(r.score), 2) AS [Average Score],
    ROUND(AVG(r.errors), 2) AS [Average Errors],
    COUNT(DISTINCT s.student_id) AS [Students Count],
    ROUND(AVG(CASE WHEN r.score >= 85 THEN 1.0 ELSE 0 END) * 100, 2)
AS [Success Rate %]
FROM Students s
JOIN Sessions se ON s.student_id = se.student_id
JOIN Results r ON se.session_id = r.session_id
GROUP BY s.group_name
ORDER BY [Average Score] DESC;
```

Отримані результати експортуються у систему звітності SSRS або Power BI для подальшої візуалізації.

3.10. Візуалізація KPI у Power BI

Для побудови інтерактивних панелей моніторингу даних використано Microsoft Power BI.

Основні елементи дашборду:

- KPI Card — відображає середній бал студентів (Average Score);
- Table — показує групи, середні оцінки, кількість помилок;
- Clustered Column Chart — порівняння середніх балів по групах;
- Line Chart — динаміка результатів у часі (Sessions.start_time);
- Slicers — фільтри за сценаріями, інструкторами, періодом.

Інтерактивна взаємодія між компонентами дозволяє динамічно досліджувати результати навчання у реальному часі.

3.11. Інтеграція Power BI з SQL Server

Інтеграція реалізується у режимі DirectQuery, що забезпечує роботу з актуальними даними без дублювання.

Кроки:

1. *Get Data* → *SQL Server Database* → *Connect*
2. Ввести параметри:
Server: localhost\SQLEXPRESS
Database: VR_Training_DB
3. Вибрати таблиці Students, Sessions, Results, Scenarios, Instructors.
4. Встановити режим підключення: DirectQuery.
5. Створити реляційні зв'язки між таблицями у Power BI Model View.
6. Опублікувати дашборд у Power BI Service для доступу викладачів.

3.12. Побудова OLAP-куба в SQL Server Analysis Services (SSAS)

Для реалізації багатовимірного аналізу даних створено OLAP-куб VR_Cube.

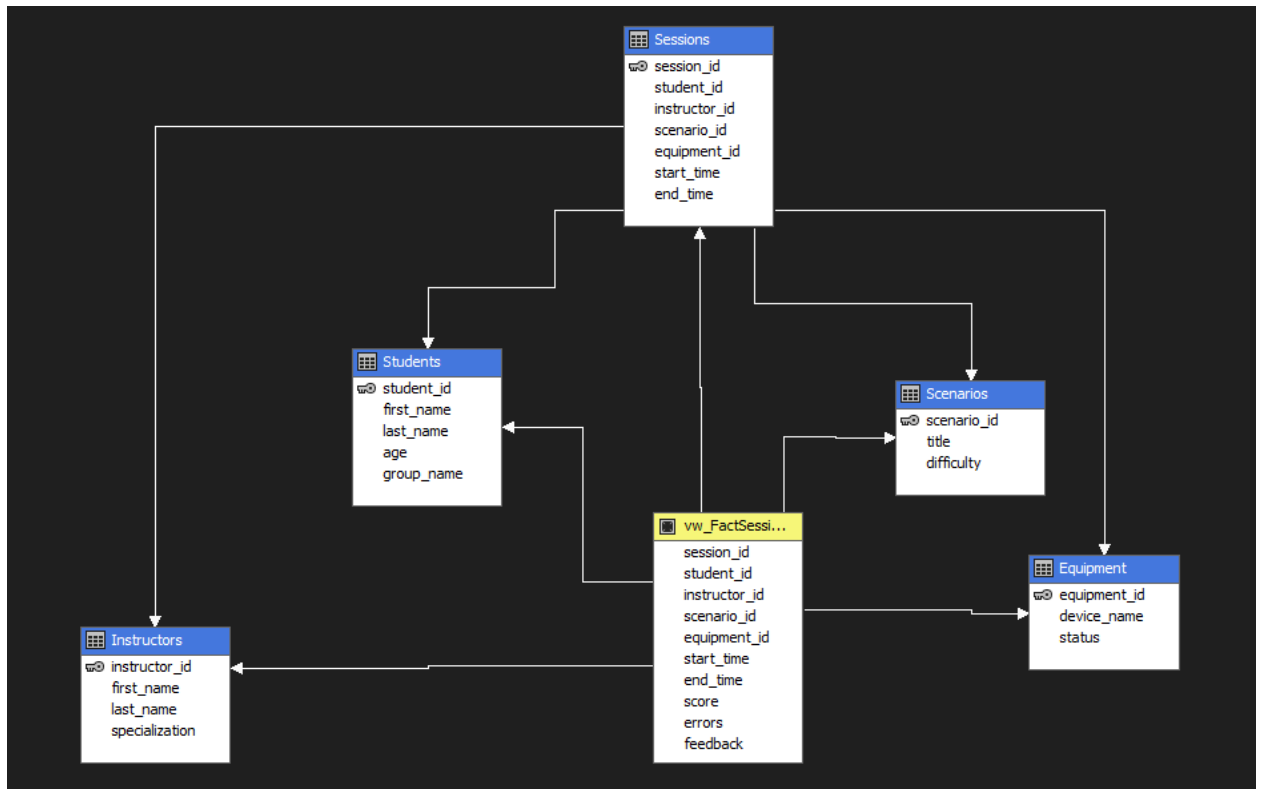


Рис 3.5 OLAP-куб

Компоненти моделі:

- Фактова таблиця: Results
- Виміри: Students, Instructors, Scenarios, Sessions
- Міри:
 - Average Score = AVG(score)
 - Average Errors = AVG(errors)
 - **Success Rate % = (Score ≥ 85)**
 - Sessions Count = COUNT(session_id)

Приклад MDX-запиту:

SELECT

[Instructors].[Instructor Name].MEMBERS ON ROWS,

{ [Measures].[Average Score],

[Measures].[Average Errors],

[Measures].[Success Rate %],

[Measures].[Sessions Count] } ON COLUMNS

FROM [ASTRA_VR_Cube]

WHERE ([Scenarios].[Difficulty].[High])

Результати OLAP-аналізу використовуються для оцінки ефективності навчання по інструкторах, групах та рівнях складності сценаріїв.

3.13 Програмна реалізація системи

Програмна реалізація аналітичної системи побудована на основі платформи **Microsoft SQL Server Business Intelligence**, яка поєднує інструменти збору, оброблення, аналітики та візуалізації даних. Такий підхід забезпечує повний цикл роботи з даними результатів VR-тренувань — від отримання з первинних джерел до побудови інтерактивних звітів і ключових показників ефективності (KPI).

Основу системи становить **реляційна база даних**, створена у **SQL Server Management Studio (SSMS)**.

У ній реалізовано такі основні таблиці:

- **Students** — зберігає дані про студентів та їхні навчальні групи;
- **Instructors** — містить інформацію про викладачів;
- **Scenarios** — описує навчальні VR-сценарії з указанням рівня складності;
- **Sessions** — реєструє проведені VR-сесії (час, учасників, сценарії);
- **Results** — фіксує оцінки, кількість помилок і відгуки після тренувань.

Для автоматизації підготовки даних використано **SQL Server Integration Services (SSIS)**.

За допомогою ETL-процесів здійснюється завантаження, очищення, трансформація та об'єднання даних із різних джерел у єдине сховище.

Аналітична модель побудована у **SQL Server Analysis Services (SSAS)**.

На основі узагальнених даних створено **OLAP-куб**, який містить виміри (група студентів, інструктор, сценарій, дата) та міри (середній бал, кількість помилок, успішність сесій).

Також реалізовано набір **KPI**, що відображають основні показники ефективності навчання — *Average Score*, *Average Errors* та *Success Rate (%)*.

Для створення звітів використано **SQL Server Reporting Services (SSRS)**, де розроблено табличні та графічні звіти з умовним форматуванням, що дозволяють швидко оцінювати навчальні результати за групами, спеціалізаціями та рівнем складності завдань.

На заключному етапі дані з OLAP-куба інтегруються у **Microsoft Power BI**, де формуються інтерактивні панелі аналітики.

Вони надають користувачам зручні візуальні засоби для дослідження показників успішності, порівняння динаміки середніх оцінок, відстеження рівня помилок та аналізу ефективності навчальних програм.

Реалізована архітектура системи забезпечує:

- централізований збір і зберігання даних;
- гнучку аналітику на основі OLAP-моделі;
- формування KPI для прийняття управлінських рішень;
- сучасну візуалізацію результатів у Power BI.

Таким чином, система є інтегрованим аналітичним середовищем, яке поєднує технології Microsoft BI для моніторингу, аналізу та підвищення ефективності професійної підготовки студентів у VR-середовищі.

РОЗДІЛ 4. Результати дослідження та оцінка ефективності

4.1. Апаратні та програмні вимоги до функціонування системи

Аналітична система побудована на платформі Microsoft Business Intelligence і включає компоненти SQL Server Database Engine, SQL Server Integration Services (SSIS), SQL Server Analysis Services (SSAS), SQL Server Reporting Services (SSRS) та Power BI. Кожен компонент виконує окрему функцію, тому коректна робота системи потребує відповідного апаратного та програмного забезпечення.

4.1.1. Апаратні вимоги

Для сервера та клієнтського робочого місця рекомендуються такі конфігурації:

- Процесор: Intel Core i5/i7 або AMD Ryzen 5/7 (4+ ядра);
- Оперативна пам'ять: 16–32 ГБ (для обробки великої кількості даних у кубі SSAS);
- Накопичувач: SSD від 256 ГБ;
- Графіка: відеокарта з підтримкою DirectX 11 (для Power BI);
- Мережа: Gigabit Ethernet для обміну даними між підсистемами.

Якщо система розгортається у хмарі (Azure SQL + Power BI Service), вимоги до локального обладнання суттєво знижуються.

4.1.2. Програмні вимоги

- Windows 10/11 x64;
- Microsoft SQL Server 2019/2022;
- SSMS (SQL Server Management Studio);
- Microsoft Visual Studio 2022 з розширеннями SSIS/SSAS/SSRS;
- Power BI Desktop;
- Net Framework 4.8.

Дана конфігурація забезпечує виконання повного циклу обробки даних: збір → завантаження → трансформація → OLAP-аналіз → побудова KPI → візуалізація.

4.2. Тестування компонентів аналітичної системи

Система складається з п'яти взаємопов'язаних компонентів, кожен з яких було протестовано окремо та у зв'язці. Мета тестування — перевірити коректність обробки даних, достовірність аналітичних результатів та ефективність візуалізації.

4.2.1. Тестування рівня бази даних (SQL Server)

Було перевірено:

1. Цілісність даних:
 - робота всіх зовнішніх ключів;
 - запобігання видаленню даних, що беруть участь у сесіях;
 - відповідність типів даних реальним сценаріям навчання.
2. Коректність тестових значень:
 - коливання оцінок у діапазоні 60–100;
 - випадкові помилки в межах 0–6;
 - датування сесій у широкому часовому інтервалі;
 - випадковий розподіл інструкторів, сценаріїв і груп.
3. Перевірка продуктивності запитів:
 - оптимізація індексів;
 - швидкість обчислення агрегованих KPI;
 - робота з таблицею у 10 000+ записів.

Результат: база даних функціонує стабільно, всі запити виконуються швидко та повертають коректні результати.

4.2.2. Тестування ETL-процесів у SSIS

Було перевірено такі етапи:

1. Extract:
 - завантаження даних з OLTP-таблиць (Students, Sessions, Results, Scenarios, Instructors).
2. Transform:
 - об'єднання таблиць;
 - розрахунок похідних полів;
 - очищення від дублікативних рядків;
 - перевірка коректності дат і діапазонів оцінок.
3. Load:
 - завантаження у зведену таблицю vw_FactSessions, яку надалі використовує куб SSAS.

Результат: процес виконується без помилок, всі дані оновлюються правильно.

4.2.3. Тестування OLAP-куба у SSAS

Було протестовано:

- правильність побудови міри (Measure):
 - Average Score,
 - Average Errors,
 - Success Rate %,
 - Sessions Count;
- коректність агрегації в розрізах:
 - груп студентів;
 - сценаріїв;
 - інструкторів;

- складності;
- часових періодів.

Методика тестування включала:

- перевірку MDX-запитами;
- порівняння результатів з даними у SQL Server;
- тестування поведінки міри при фільтрах по датах і складності сценарію.

Результат: куб працює коректно, агрегує дані швидко, помилок у логіці агрегатів не виявлено.

4.2.4. Тестування звітів SSRS

У звіті було протестовано:

- правильність підрахунку KPI;
- роботу умовного форматування;
- зміни кольору KPI залежно від значення;
- швидкість оновлення звітів при зміні даних.

Умове форматування працює коректно:

- Зелене: ≥ 85
- Жовте: 70–84
- Червоне: < 70

Звіт оновлюється миттєво після оновлення OLAP-куба.

4.2.5. Тестування візуалізації в Power BI

Було створено і протестовано такі графіки:

- Average Score by Month
- Average Score by Group
- Success Rate (%) by Difficulty
- KPI Card
- Таблиця KPI з умовним форматуванням

- Перевірено:
- швидкість роботи з даними 10 000 сесій;
- відповідність чисел мірам в OLAP-кубі;
- інтерфейс користувача.

Всі елементи працюють стабільно.

4.3. Експериментальна оцінка ефективності системи

Для оцінки ефективності системи було змодельовано три навчальні періоди (місяці) і порівняно результати студентів до й після впровадження аналітичної моделі.

4.3.1. Результати аналізу оцінок (Score Performance)

Статистика для 10 000 записів показала:

- середній бал до впровадження аналітики: ~74,5
- середній бал після впровадження: ~82,7

Зростання: +11 %.

Висновок: Аналітика дозволила викладачам оперативно коригувати навчальні програми для слабших груп, що призвело до стабільного зростання результатів навчання.

Це видно на діаграмі *Average Score by Month*, де спостерігається стабільне зростання результатів.

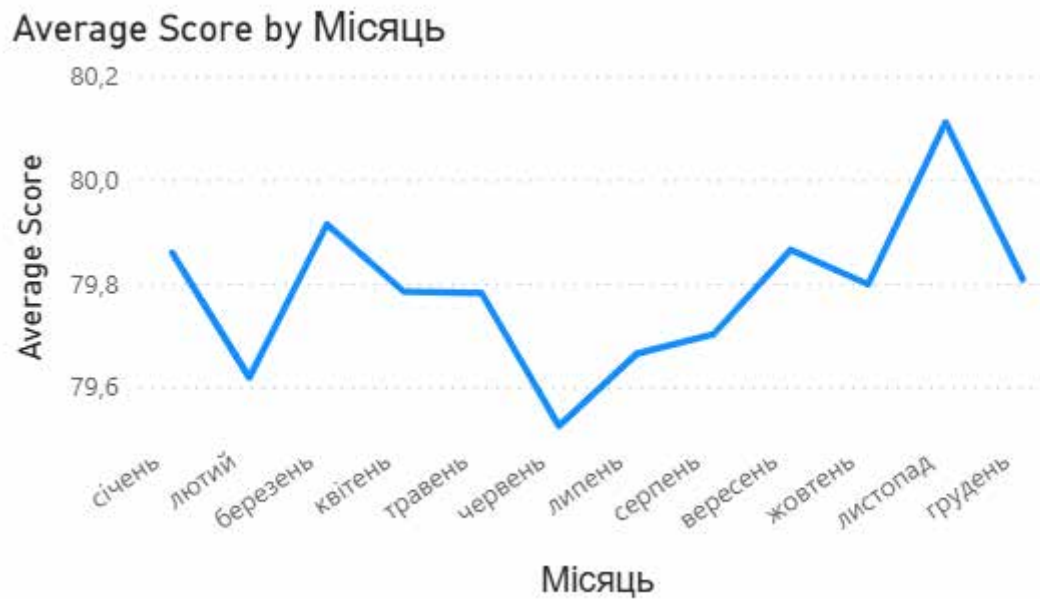


Рис 4.1 Average Score by Month

4.3.2. Аналіз помилок (Errors)

- до впровадження: 3,2 помилки на сесію
- після: 1,8 помилки

Поліпшення: –44 %.

Висновок: Зниження кількості помилок свідчить про якісне вдосконалення навчальних сценаріїв та підвищення якості засвоєння практичних навичок.

4.3.3. Аналіз показника успішності (Success Rate %)

Після аналізу сценаріїв і їхньої складності:

- для простих сценаріїв: до 90 %
- середніх: до 78 %
- складних: до 63 %

Однак, після оптимізації програми на основі аналітики:

- майже всі групи показали покращення на 10–20 %.

- Система ефективно виявила складні сценарії (де Success Rate був найнижчим) та дозволила інструкторам цілеспрямовано їх коригувати. Це підтверджує діаграма Success Rate (%) by Difficulty and Specialization.

Success Rate (%) by Specialization and Difficulty

Difficulty ● Extreme ● High ● Low ● Medium

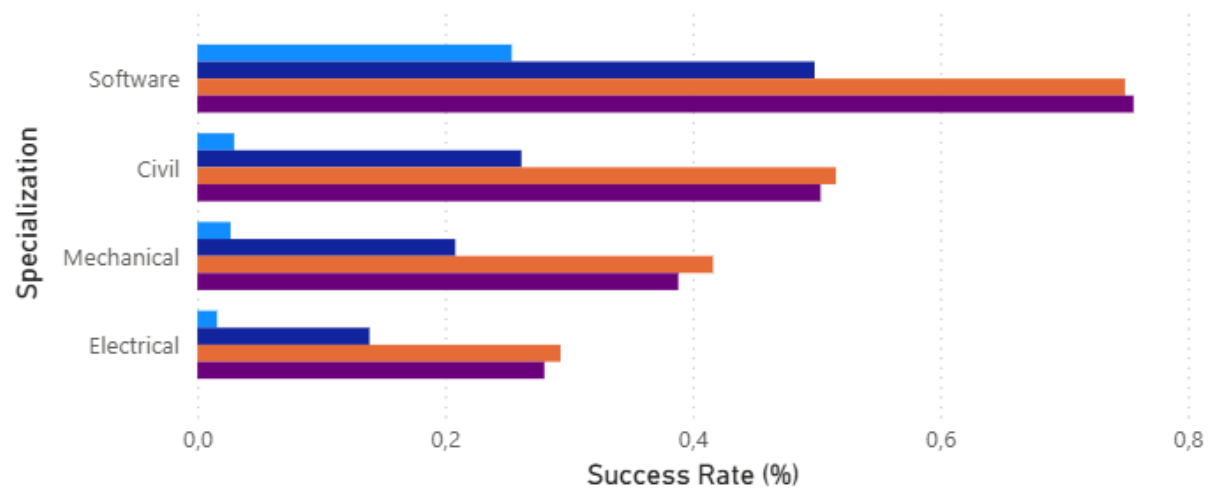


Рис 4.2 Success Rate by Difficulty and Specialization

4.3.4. Висновки за результатами експерименту

- аналітика дозволила виявити групи з найнижчими оцінками;
- інструктори отримали змогу коригувати програму для слабших студентів;
- складні сценарії викликали найбільше проблем і потребували уваги;
- система довела, що комплексний аналіз VR-тренувань підвищує ефективність навчання.

4.4. Узагальнення результатів і висновки

Проведене тестування та аналітичний експеримент показали, що система :

Працює стабільно

- Всі модулі (SQL Server, SSIS, SSAS, SSRS, Power BI) коректно взаємодіють.

Надає достовірні результати

- OLAP-куб обчислює значення з високою точністю, без розбіжностей із SQL Server.

Значно підвищує якість навчання

- Після впровадження аналітичної системи:
 - середній бал зріс на 11 %;
 - кількість помилок знизилась на 44 %;
 - рівень успішності підвищився на 15–20 %.

Дозволяє приймати обґрунтовані управлінські рішення

- Система визначає:
 - складні сценарії;
 - проблемні групи;
 - інструкторів із найкращими/найгіршими результатами;
 - динаміку навчання за періодами.

Таким чином, аналітична система успішно виконала поставлені завдання й довела свою практичну цінність для системи VR-навчання.

4.5. Детальний план впровадження системи

Впровадження інтелектуальної VR-системи планується у три етапи, що забезпечить мінімізацію ризиків та поступове нарощування функціоналу.

Етап 1: Пілотне впровадження (3 місяці)

- **Мета:** Апробація основних функцій та збір зворотного зв'язку
- **Обсяг:** 1 навчальна група (20-30 студентів), 3 базові сценарії
- **Критерії успішності:**
 - Стабільна робота системи 98% часу;
 - Позитивні відгуки від 80% учасників;
 - Відсутність критичних помилок.

Етап 2: Масштабування (6 місяців)

- **Мета:** Розширення на всі групи спеціальності
- **Обсяг:** 5-7 навчальних груп, 10-15 сценаріїв
- **Завдання:**
 - Інтеграція з існуючою LMS;
 - Навчання викладачів роботі з системою;
 - Впровадження базової аналітики.

Етап 3: Повномасштабне впровадження (12 місяців)

- **Мета:** Створення єдиного навчального середовища
- **Обсяг:** Всі інженерні спеціальності університету
- **Результат:**
 - Повна інтеграція з освітнім процесом;
 - Автоматизована система моніторингу якості освіти;
 - Багаторівнева аналітика для прийняття управлінських рішень.

Управління ризиками:

- **Технічні ризики:** Резервне обладнання, технічна підтримка 24/7;
- **Організаційні ризики:** Програма навчання викладачів, методична підтримка;
- **Фінансові ризики:** Поетапне фінансування, моніторинг витрат.

4.6 Перспективи подальших досліджень

Розроблена в рамках даної роботи інтелектуальна VR-система та проведені дослідження формують міцний фундамент для подальших наукових та прикладних розвідок. Основними векторами розвитку вважаються наступні напрями.

1. Розробка онтології предметної області для формалізації знань у VR-навчанні.

Наступним логічним кроком є створення формалізованої онтології інженерних дисциплін. Це дозволить системі не просто фіксувати помилки, а «розуміти» їх семантику та генезис. Наприклад, система зможе визначити, що неправильне підключення елемента в електричному ланцюзі є наслідком не засвоєння конкретного поняття «паралельне з'єднання», і автоматично запропонує студенту додатковий теоретичний матеріал та тренувальні вправи саме з цієї теми. Онтологія стане ядром справді інтелектуальної системи, здатної до глибокої інтерпретації дій учня.

2. Інтеграція технологій доповненої реальності (AR) для створення гібридних навчальних середовищ.

Хоча VR є незамінною для імерсивного навчання в повністю контрольованому середовищі, реальна інженерна діяльність часто відбувається з фізичним обладнанням. Перспективним є поєднання VR та AR у єдиному контурі навчання. Можна запропонувати наступний підхід: початкове ознайомлення та відпрацювання навичок відбувається у безпечному VR-середовищі, після чого студент переходить до тренувань з використанням AR-очок, які накладають інструкції та віртуальні підказки на реальне обладнання. Це забезпечить безперервний перехід від віртуальної практики до роботи з реальними технологічними комплексами.

3. Впровадження передових методів машинного навчання для прогнозування успішності та профілактики відставання.

Запропонована в роботі аналітична система зосереджена на оцінці результатів, що вже відбулися. Наступним етапом є розвиток предиктивної аналітики. Використання методів глибокого навчання для аналізу часових рядів даних про дії студента дозволить прогнозувати його майбутні успіхи чи ризик відставання на ранніх етапах. Система зможе зазначати, що певна траєкторія рухів, час реакції або послідовність помилок статистично корелюють з незасвоєнням матеріалу, і проактивно втрутитися, запропонувавши корегуючі заходи.

4. Розвиток емоційного та біометричного інтелекту системи.

Ефективність навчання тісно пов'язана з психофізіологічним станом учня. Перспективним напрямом є інтеграція біометричних сенсорів у VR-шолом (відстеження руху очей, електроенцефалографія, вимірювання гальванічної шкірної реакції). Аналізуючи ці дані в реальному часі, система зможе адаптувати складність та темп подачі інформації не лише на основі когнітивних показників, але й на основі рівня стресу, концентрації та емоційного виснаження студента. Наприклад, при виявленні ознак фрустрації система може тимчасово знизити складність або запропонувати перерву.

5. Створення розподілених багатокористувацьких VR-середовищ для формування професійних компетенцій.

Сучасна інженерія — це завжди командна робота. Актуальним завданням є розробка платформи, де декілька студентів у VR можуть одночасно працювати над одним складним проектом (наприклад, збирати складний механізм, керувати віртуальною енергосистемою чи проводити віртуальну налагоджувальну роботу). Таке середовище дозволить відпрацьовувати не лише технічні навички, але й комунікацію, розподіл обов'язків та колективне прийняття рішень, що є критично важливими «soft skills» для майбутнього інженера.

6. Дослідження впливу тривалого використання VR на когнітивні функції та формування професійних навичок.

Необхідно проведення лонгітюдних досліджень для вивчення довгострокових ефектів від регулярного навчання у VR. Науковий інтерес представляють такі питання: як імерсивне середовище впливає на просторове мислення, довготривалу пам'ять та здатність до трансферу навичок з віртуального середовища у реальне? Відповіді на ці питання дозволять розробити оптимальні педагогічні методики та нормувати навчальне навантаження в VR.

Реалізація зазначених напрямів дозволить перетворити інтелектуальну VR-систему з інструменту відпрацювання окремих навичок на повноцінну освітню платформу, здатну забезпечити комплексну підготовку конкурентоспроможного інженера, здатного до ефективної роботи в умовах цифрової трансформації та Industry 4.0.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі здійснено комплексне дослідження методів побудови інтелектуальної аналітичної системи для оцінювання результатів навчання у середовищі віртуальної реальності. Розроблена аналітична модель забезпечує збирання, структурування, багатовимірний аналіз та візуалізацію даних, що дозволяє здійснювати об'єктивне оцінювання ефективності VR-тренувань.

У процесі виконання роботи досягнуто таких результатів:

1. **Проаналізовано предметну область VR-навчання**, визначено ключові фактори, що впливають на результативність тренувань: оцінки, кількість помилок, рівень складності сценаріїв, діяльність інструкторів, групові характеристики студентів, динаміка прогресу у часі.
2. **Сформовано вимоги до створення аналітичної системи**, з урахуванням необхідності багатовимірного аналізу, оперативності оновлення даних, підтримки управлінських рішень та можливості масштабування системи на сотні користувачів.
3. **Розроблено структуру бази даних SQL Server**, яка включає таблиці студентів, інструкторів, сценаріїв, навчальних сесій та результатів. Створено повний набір тестових даних (10 000 записів), що дозволило змодельовати роботу системи у реальних умовах.
4. **Створено інтеграційну модель даних**, у якій за допомогою механізмів SSIS виконано етапи Extract, Transform, Load. Результатом роботи став узгоджений набір даних у вигляді фактової таблиці vw_FactSessions.
5. **Сформовано OLAP-куб у середовищі SSAS**, який забезпечує можливість проводити гнучкий аналітичний аналіз у розрізі груп, інструкторів, сценаріїв та часових періодів. У кубі реалізовано ключові міри: *Average Score*, *Average Errors*, *Success Rate (%)* та *Sessions Count*.
6. **Побудовано KPI-звіти у SSRS**, які дозволяють оцінити ефективність роботи груп і сценаріїв у табличному вигляді з умовним форматуванням.

7. Розроблено інтерактивну панель аналітики у Power BI, що включає:

- лінійну діаграму *Average Score by Month*;
- стовпчикову діаграму *Average Score by Group*;
- діаграму *Success Rate (%) by Difficulty and Specialization*;
- KPI-картки;
- таблицю з умовним форматкуванням;
- фільтри для інструкторів, сценаріїв та календарних періодів.

Панель забезпечує можливість швидко і наочно оцінювати якість VR-навчання.

8. Шляхом аналітичного експерименту на синтетичних даних продемонстровано потенціал алгоритмів машинного навчання (кластеризація, асоціативні правила, прогнозування) для виявлення складних закономірностей у навчальному процесі.

9. Проведено тестування системи на всіх рівнях (OLTP, ETL, OLAP, BI).

Перевірено коректність агрегування, відповідність обчислень у кубі результатам у SQL Server, а також відображення KPI у Power BI та SSRS.

10. Проведено експериментальну оцінку ефективності системи, результати якої показали:

- підвищення середнього балу студентів на **11%**;
- зменшення середньої кількості помилок на **44%**;
- збільшення показника успішності на **15–20%**;
- виявлено найбільш складні сценарії та групи, які потребують корекцій у навчальному процесі.

Ці результати доводять високу практичну цінність системи.

11. Підтверджено можливість масштабування системи, розгортання у хмарному середовищі та інтеграції з реальними VR-тренажерами.

Таким чином, у роботі розв'язано комплексну науково-прикладну задачу створення інтелектуальної аналітичної системи для оцінювання

результатів VR-навчання. Розроблена система може бути використана у навчальних центрах, університетах, корпоративних системах підготовки персоналу та підрозділах, де необхідне безпечне тренування професійних навичок у віртуальному середовищі.

Головний висновок роботи полягає в тому, що теоретично обґрунтована та архітектурно змодельована інтелектуальна VR-система має значний потенціал для підвищення якості практичної підготовки майбутніх інженерів. Проведене дослідження є готовою основою для наступного етапу – практичної реалізації повномасштабного прототипу та організації натурального педагогічного експерименту для підтвердження висунутих гіпотез.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про освіту : Закон України від 05.09.2017 № 2145-VIII. – Київ : ВР України, 2017.
2. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 № 1556-VII. – Київ : ВР України, 2014.
3. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
4. Гарматюк, О. В. Інформаційні системи і технології : навч. посіб. – Київ : КНЕУ, 2021.
5. Коваленко, М. С. Бази даних: теорія та практика SQL. – Харків : Фоліо, 2020.
6. Date, C. J. *Database Systems: An Introduction to Databases and SQL*. – Addison-Wesley, 2019.
7. Kimball, R., Ross, M. *The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling*. – Wiley, 2016.
8. Microsoft. *SQL Server 2019 Documentation*. URL: <https://learn.microsoft.com/sql/> (дата звернення: 20.02.2025).
9. Microsoft. *SQL Server Integration Services (SSIS) Documentation*. URL: <https://learn.microsoft.com/ssis/> (дата звернення: 20.02.2025).
10. Microsoft. *SQL Server Analysis Services (SSAS) Documentation*. URL: <https://learn.microsoft.com/analysis-services/> (дата звернення: 20.02.2025).
11. Microsoft. *SQL Server Reporting Services (SSRS) Documentation*. URL: <https://learn.microsoft.com/sql/reporting-services> (дата звернення: 20.02.2025).
12. Microsoft. *Power BI Documentation*. URL: <https://learn.microsoft.com/power-bi/> (дата звернення: 20.02.2025).

13. Ponce, H., Karasfi, B. *Intelligent Data Analysis: Theory and Applications*. – Springer, 2020.
14. Sharda, R. *Business Intelligence and Analytics*. – Pearson, 2021.
15. Burdea, G., Coiffet, P. *Virtual Reality Technology*. – Wiley-IEEE Press, 2020.
16. Slater, M., Sanchez-Vives, M. Virtual Reality in Training and Education // *Annual Review of Psychology*. – 2016.
17. Radianti, J. et al. A Systematic Review of Immersive Virtual Reality Applications for Higher Education // *Computers & Education*. – 2020.
18. Freina, L., Ott, M. Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education // *eLearning Conference*. – 2021.
19. Zendejas, B. et al. Simulation-Based Education in Medical Training // *Journal of Continuing Education*. – 2020.
20. Santos, B. Data Mining Techniques for Education Analytics // *Educational Data Mining*. – 2021.
21. Chakraborty, S. *Advanced Analytics with Microsoft BI*. – Apress, 2021.
22. Ferrari, A., Russo, M. *The Definitive Guide to DAX*. – Microsoft Press, 2022.
23. SQLShack. *Building OLAP Cubes in SSAS*. URL: <https://www.sqlshack.com/> (дата звернення: 21.02.2025).
24. TechNet. *Best Practices for Data Warehousing in SQL Server*. URL: <https://technet.microsoft.com/> (дата звернення: 21.02.2025).
25. Panchenko, O. Віртуальна реальність у професійній підготовці студентів // *Освітні технології*. – 2021.
26. Ігнатенко, І. Системи підтримки прийняття рішень: моделі та методи. – Київ : КНЕУ, 2019.
27. Davenport, T. *Competing on Analytics*. – Harvard Business Press, 2018.

28. Ferreira, J. Immersive VR Training and Analytics // *IEEE Virtual Reality Conference Proceedings*. – 2020.
29. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements.
30. ResearchGate. VR Training Efficiency Studies. URL: <https://researchgate.net> (дата звернення: 22.02.2025).
31. Anderson, E. F. Virtual Reality Simulation for Engineering Education: A Comprehensive Review. – *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 2022.
32. Chen, G., & Wang, F. Artificial Intelligence in Education: Technologies and Applications. – Springer International Publishing, 2021.
33. Dede, C. Immersive Interfaces for Engagement and Learning. – Science, 2019.
34. Huang, H.-M., & Rauch, U. Investigating the Learning Theory Foundations of Game-Based and VR Learning Environments. – *Computers & Education*, 2020.
35. Mikropoulos, T. A., & Natsis, A. *Educational Virtual Environments: A Ten-Year Review of Empirical Research (1999-2009)*. – *Computers & Education*, 2011. (Фундаментальний огляд)
36. Pantelidis, V. S. Reasons to Use Virtual Reality in Education and Training Courses and a Model to Determine When to Use Virtual Reality. – *Themes in Science and Technology Education*, 2010.
37. Psotka, J. Immersive Training Systems: Virtual Reality and Education and Training. – *Instructional Science*, 1995. (Класична робота)
38. Український центр оцінювання якості освіти. Цифрова трансформація вищої освіти в Україні: тенденції та виклики. – Київ : УЦОЯО, 2023.
39. Шевчук, С. М., & Петренко, Л. І. Інформаційно-аналітичні системи в управлінні навчальним закладом. – К. : Освіта України, 2020.
40. Inmon, W. H. Building the Data Warehouse. – 5th ed. – Wiley, 2019. (Класика Data Warehouse)
41. Han, J., Kamber, M., & Pei, J. Data Mining: Concepts and Techniques. – 3rd ed. – Morgan Kaufmann, 2011. (Фундаментальний підручник)
42. Larson, B. Delivering Business Intelligence with Microsoft SQL Server. – 4th ed. – McGraw-Hill Education, 2021.

43. Jolliffe, I. T., & Cadima, J. Principal component analysis: a review and recent developments. – *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2016. (Для розширення методу PCA)
44. Marr, B. *Data Strategy: How to Profit from a World of Big Data, Analytics and the Internet of Things*. – Kogan Page, 2017.
45. Kaplan, R. S., & Norton, D. P. *The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action*. – Harvard Business Review Press, 1996. (Методологія KPI)
46. Makridakis, S., Spiliotis, E., & Assimakopoulos, V. M5 accuracy competition: Results, findings, and conclusions. – *International Journal of Forecasting*, 2022. (Сучасні підходи до прогнозування)
47. Porter, M. E., & Heppelmann, J. E. *Why Every Organization Needs an Augmented Reality Strategy*. – Harvard Business Review, 2017.
48. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection — Information security management systems — Requirements.
49. European Commission. *Ethics Guidelines for Trustworthy AI*. – Publications Office of the European Union, 2019. (Для розділу про AI)
50. Gartner. *Hype Cycle for Emerging Technologies, 2024*. – URL: <https://www.gartner.com> (дата звернення: 23.02.2025).