

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення
освітньо-професійної програми «Інженерія програмного забезпечення»

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

_____ Богдан ЧЕРКАС
(підпис)

Виконав: здобувач вищої освіти групи ПДМ-61
Богдан ЧЕРКАС

Керівник: _____ Юрій ЗАДОНЦЕВ
канд. техн. наук

Рецензент: _____
науковий ступінь, Ім'я, ПРИЗВИЩЕ
вчене звання

Київ 2026

**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій

Кафедра Інженерії програмного забезпечення

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 121 Інженерія програмного забезпечення

Освітньо-професійна програма «Інженерія програмного забезпечення»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Інженерії програмного забезпечення

_____ Ірина ЗАМРІЙ

« _____ » _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Черкасу Богдану Васильовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес»

керівник кваліфікаційної роботи Юрій ЗАДОНЦЕВ, канд. техн. наук,

затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» жовтня 2025 р. № 467.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «19» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи: науково-технічна література з питань використання AR в освіті, методології педагогічного дизайну, методи оцінювання когнітивного навантаження, стандарти та документація платформ AR.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз предметної галузі, класифікація технологій AR та дослідження педагогічних стратегій їх впровадження у вищій освіті.

2. Розробка алгоритму комплексної інтеграції AR та математичної моделі (індексу) оцінки доцільності впровадження.

3. Програмна реалізація засобу оцінки доцільності та аналітичне порівняння ефективності сприйняття матеріалу із застосуванням та без застосування AR.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація

1. Порівняння існуючих методів.
2. Алгоритм інтеграції AR в навчальний процес.
3. Діаграма послідовності інтеграції AR в навчальний процес.
4. Логіко-математична модель оцінки доцільності AR.
5. Схема оцінки доцільності ar.
6. Порівняння існуючих способів оцінки сприйняття.
7. Моделювання часу сприйняття засвоєного матеріалу за допомогою NGOMSL.

6. Дата видачі завдання «31» жовтня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз наявної науково-технічної літератури	31.10 - 02.11.2025	
2	Аналіз предметної галузі застосування AR в освіті	02.11 - 05.11.2025	
3	Розробка алгоритму комплексної інтеграції AR	05.11 - 10.11.2025	
4	Побудова математичної моделі індексу доцільності впровадження AR	10.11 - 15.11.2025	
5	Розробка програмного засобу для оцінки доцільності	15.11 - 20.11.2025	
6	Моделювання сприйняття матеріалу методом NGOMSL та аналіз результатів	20.11 - 22.11.2025	
7	Оформлення роботи: вступ, висновки, реферат та розробка демонстраційних матеріалів	22.11 - 25.11.2025	
8	Проходження нормоконтролю та перевірка на плагіат	25.11 - 07.12.2025	
9	Подача роботи на кафедру	07.12 - 19.12.2025	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Богдан ЧЕРКАС

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Юрій ЗАДОНЦЕВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 85 стор., 3 табл., 7 рис., 23 джерела.

Мета роботи - підвищення сприйняття навчального матеріалу під час навчання студентів закладів вищої освіти шляхом застосування алгоритму комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

Об'єкт дослідження – процес інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

Предмет дослідження – комплексна інтеграція технології доповненої реальності в навчальний процес.

У роботі проаналізовано сучасні підходи до використання технологій доповненої реальності в освіті та узагальнено педагогічні й технічні вимоги до AR-компонентів навчальних курсів. Сформовано критерії доцільності інтеграції доповненої реальності в навчальний процес і запропоновано систему метрик для оцінювання сприйняття навчального матеріалу в курсах з AR-підтримкою та без неї. Розроблено алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності, який визначає послідовність етапів, ролі учасників та умови активації AR-сценаріїв у межах навчального модуля.

На основі алгоритму побудовано модель індексу доцільності використання AR, що враховує навчальні цілі, типи діяльності, характеристики аудиторії та обмеження ресурсів, а також виконано сценарне моделювання роботи алгоритму на типових прикладах інтеграції AR у навчальні дисципліни. Сформовано набір артефактів для практичного застосування алгоритму (шаблони вимог, структурні й поведінкові діаграми, приклади AR-сценаріїв), а також спроектовано структуру програмного модуля для автоматизованого розрахунку індексу доцільності інтеграції AR у конкретний навчальний курс.

Наукова новизна роботи полягає у розробці алгоритму інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес, який задає цілісну послідовність

етапів, ролей і умов активації AR-компонентів та пов'язує їх із формалізованими метриками сприйняття навчального матеріалу. Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання запропонованого алгоритму й супровідних артефактів для планування, документування та удосконалення курсів з AR-підтримкою у закладах вищої освіти без обов'язкової наявності реалізованого AR-прототипу на початкових етапах впровадження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДОПОВНЕНА РЕАЛЬНІСТЬ, НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС, АЛГОРИТМ ІНТЕГРАЦІЇ, НАВЧАЛЬНИЙ КУРС, ІНДЕКС ДОЦІЛЬНОСТІ, ARCORE, ARKIT.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 85 pages, 3 tables, 7 pictures, 23 sources.

The purpose of the work is to enhance students' perception of learning material in higher education by applying an algorithm for the comprehensive integration of augmented reality technology into the educational process

Object of research is the process of integrating augmented reality technology into the educational process.

Subject of research is the comprehensive integration of augmented reality technology into the educational process.

The thesis analyses modern approaches to the use of augmented reality technologies in education and summarises pedagogical and technical requirements for AR components of academic courses. Criteria for the feasibility of integrating augmented reality into the educational process are formulated, and a system of metrics is proposed for assessing the perception of learning material in courses with and without AR support. An algorithm for the comprehensive integration of augmented reality technology is developed, which defines the sequence of stages, the roles of participants, and the conditions for activating AR scenarios within an instructional module.

On the basis of this algorithm, a model of an AR feasibility index is constructed, which takes into account learning objectives, types of activities, audience characteristics and resource constraints. Scenario-based modelling of the algorithm's operation is carried out on typical examples of AR integration into academic disciplines. A set of artifacts for the practical application of the algorithm is formed (requirement templates, structural and behavioural diagrams, examples of AR scenarios), and the structure of a software module is designed for automated calculation of the AR integration feasibility index for a specific course.

The scientific novelty of the work lies in the development of an algorithm for integrating augmented reality technology into the educational process, which specifies a

coherent sequence of stages, roles and conditions for activating AR components and links them with formalised metrics of learning material perception. The practical significance of the results obtained is that the proposed algorithm and accompanying artifacts can be used to plan, document and improve AR-supported courses in higher education institutions without the mandatory availability of a fully implemented AR prototype at the initial stages of implementation.

KEYWORDS: AUGMENTED REALITY, EDUCATIONAL PROCESS, INTEGRATION ALGORITHM, ACADEMIC COURSE, FEASIBILITY INDEX, ARCORE, ARKIT.

ЗМІСТ

ВСТУП	11
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ОСВІТІ	13
1.1 Сутність та класифікація технологій доповненої реальності	13
1.2 Сфери використання та способи впровадження технологій доповненої реальності у вищій освіті	20
1.3 Педагогічні основи та дидактичний потенціал AR	26
1.4 Потреби навчального процесу, що зумовлюють необхідність розроблення алгоритму комплексної інтеграції AR з перевіркою доцільності	30
1.5 Висновки дослідження підходів до інтеграції AR	34
2 АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС	36
2.1 Опис алгоритму інтеграції AR	36
2.2 Формула індексу доцільності застосування AR у курсі	41
2.3 Розрахунок показника доцільності	46
Висновки до розділу 2	49
3 РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ AR ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	50
3.1 Розробка програмного засобу оцінки доцільності впровадження технології AR	50
3.2 Аналіз методів оцінювання сприйняття навчального матеріалу	56
3.3 Моделювання з NGOMSL	60
3.4 Висновки до розділу 3	74
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79
ДОДАТОК А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	81
ДОДАТОК Б. ЛИСТИНГ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ	88

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасна вища освіта стикається з викликом візуалізації складних абстрактних понять та процесів, які важко пояснити традиційними засобами. Технологія доповненої реальності (AR) пропонує потужний інструментарій для вирішення цієї проблеми, дозволяючи накладати цифровий контент на реальний світ. Проте у багатьох навчальних курсах AR впроваджується фрагментарно: як окремі ефекти візуалізації, разові демонстрації чи “цікаві додатки”, що не гарантує системного приросту навчальних результатів і часто перевантажує викладача технічними питаннями. Наразі відсутній уніфікований підхід, який би поєднував технічні можливості AR з педагогічними цілями. Тому актуальною є потреба у розробці цілісного алгоритму інтеграції, який визначає: що саме й навіщо робити, хто за що відповідає, на якому кроці запускати AR-сценарії та як вимірювати їхню користь для студента.

Мета - підвищення сприйняття навчального матеріалу під час навчання студентів закладів вищої освіти шляхом застосування алгоритму комплексної інтеграції технології доповненої реальності в освітній процес.

Для досягнення мети вирішуються завдання:

1. Проаналізувати існуючі способи інтеграції AR в освітні процеси.
2. Розробити алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.
3. Розробити програмний продукт для визначення доцільності використання AR.
4. Оцінити сприйняття навчального матеріалу з використанням та без використання AR

Об’єкт дослідження – процес інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

Предмет дослідження – комплексна інтеграція технології доповненої реальності в навчальний процес.

Наукова новизна - розробка алгоритму інтеграції технології доповненої

реальності в навчальний процес, який визначає послідовність етапів, ролі учасників та умови активації AR-компонентів, що забезпечує покращення засвоєння матеріалів теоретичних та практичних занять завдяки цілісності та ефективності впровадження цієї технології в освітнє середовище.

Методи дослідження: У роботі використано теоретичні методи (аналіз навчальних результатів, педагогічний дизайн, моделювання процесів) для розробки структури алгоритму.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку джерел та додатків.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ОСВІТІ

1.1 Сутність та класифікація технологій доповненої реальності

Доповнена реальність (Augmented Reality, AR) - це підхід, за якого цифровий контент (текст, зображення, відео, 3D-моделі) накладається на реальний світ у режимі реального часу. На відміну від віртуальної реальності (VR), яка повністю занурює користувача в штучне, комп'ютером згенероване середовище та ізолює його від фізичного простору, AR доповнює те, що людина бачить навколо себе.

У класичному академічному баченні AR належить до ширшого поняття «змішана реальність» (Mixed Reality, MR) [15]. Основоположним для цього є континуум «Реальність – Віртуальність» (Reality-Virtuality Continuum), запропонований Полом Мілгремом та Фуміо Кішіно у 1994 році [1]. Це поняття (рис. 1.1) описує спектр між повністю реальним середовищем (Real Environment) та повністю віртуальним (Virtual Environment) [3]. AR знаходиться на цьому спектрі ближче до реального світу.

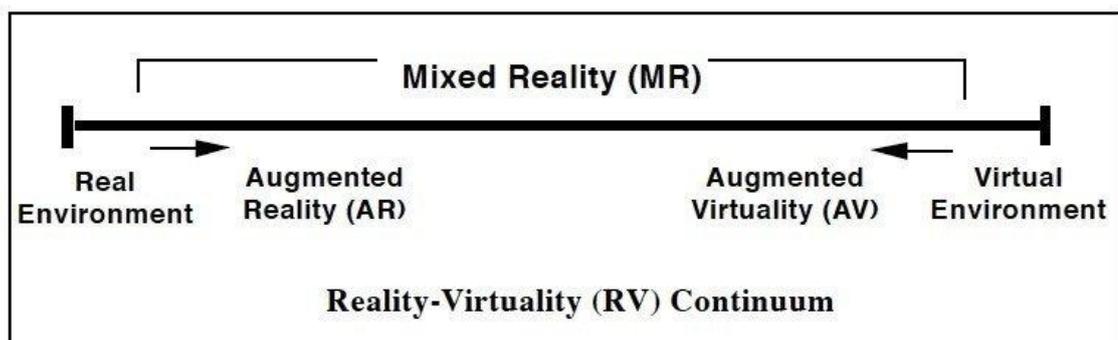


Рис. 1.1 Континуум Реальності-Віртуальності

Для чіткої інженерної ідентифікації в науковій спільноті прийнято спиратися на класичне визначення AR, сформульоване Рональдом Азумою у 1997 році [2]. Згідно з ним, «справжня» AR-система повинна одночасно відповідати трьом ключовим вимогам:

- Поєднання реального та віртуального: система накладає віртуальні об'єкти на реальний світ.
- Інтерактивність у реальному часі: користувач може взаємодіяти з віртуальними об'єктами в процесі їх накладення.
- Коректна 3D-реєстрація: віртуальні об'єкти «тримаються» свого місця у 3D-просторі, коли користувач змінює ракурс камери.

Третя вимога, 3D-реєстрація, є ключовою: віртуальні об'єкти мають залишатися зафіксованими у просторі. Тобто, коли користувач обходить віртуальну 3D-модель, він бачить її з різних боків, а не просто «плаваючу» плоску картинку.

Сучасна мобільна AR працює переважно на платформах ARCore [4] (розроблена Google для Android) та ARKit [5] (розроблена Apple для iOS). Для коректної 3D-реєстрації ці платформи виконують три пов'язані процеси в реальному часі:

1. Відстеження положення (Tracking). Пристрій (смартфон) визначає своє положення та орієнтацію у просторі (шість ступенів свободи, 6DoF) через комбінацію двох технологій:
2. Візуально-інерціальна одометрія (VIO): алгоритми SLAM (Simultaneous Localization and Mapping – одночасна локалізація та картографування) аналізують відеопотік з камери, ідентифікуючи тисячі особливих точок (контрастні кути, краї об'єктів, плями на текстурі тощо).
3. Інерційний вимірювальний блок (IMU): апаратний чип (акселерометр та гіроскоп) відстежує швидкі рухи та орієнтацію.

SLAM поєднує дані з камери і IMU, будуючи паралельно 3D-карту простору та визначаючи місце телефону в цій карті.

1. Розуміння сцени (Scene Understanding). Програмне забезпечення інтерпретує геометрію навколишнього світу:

2. Детекція площин: базовий рівень — визначення горизонтальних або вертикальних поверхонь (підлога, стіл, стіна) для розміщення об'єктів.
3. Глибинне бачення: флагманські пристрої використовують LiDAR (у Apple iPhone/iPad Pro) або Depth API (в ARCore з ToF-сенсорами). Ці засоби миттєво формують карту глибини, дозволяючи реалізувати оклюзію — коректне перекриття віртуальних об'єктів реальними об'єктами сцени.
4. Відтворення (Rendering). На фінальному кроці віртуальні об'єкти рендеряться у потрібному місці. Щоб об'єкт не виглядав як «наліпка», платформи виконують оцінку освітлення (Light Estimation): аналізують зображення з камери, щоб визначити інтенсивність та колірну температуру світла в реальній сцені, аби віртуальний об'єкт відкидав правдоподібні тіні.

Технологічні основи мобільної AR (ARCore/ARKit). Серцем мобільної AR є саме візуально-інерціальна одометрія (VIO). Ланцюжок трансформацій можна уявити так: світова система координат → якір (anchor) → об'єкт. Камера рухається у «світі», але віртуальні моделі залишаються прив'язаними до своїх якорів, завдяки чому не «пливуть» при зміні ракурсу.

У кожному кадрі розробник отримує типовий набір даних (артефактів) від платформи AR: позу камери (матриці перетворення), трекінгові ознаки сцени (хмару точок і/або карту глибини для оклюзії), трековані об'єкти (площини, маркери), якірні точки та оцінку освітлення (яскравість, температура світла). Це дозволяє програмі динамічно підлаштовувати віртуальні об'єкти під реальні умови.

Сучасні AR-платформи забезпечують глибоке «розуміння сцени»: окрім площин, вони можуть розпізнавати референсні зображення (маркерні картинки), 3D-об'єкти, обличчя чи руки, а також підтримують просторову чи географічну прив'язку (хмарні та геопросторові якірні точки). Практичний наслідок: перед початком AR-демонстрації варто «пройтися» камерою по аудиторії, щоб пристрій зібрав достатньо особливих точок для надійного трекінгу.

З математичної точки зору, формальна постановка задачі 3D-реєстрації є ключовою [17]. Нехай точка віртуального об'єкта в світовій системі координат – $X_w \in R^3$, R_{cw}, t_{cw} – зовнішні параметри камери (положення і орієнтація), а K – матриця внутрішніх параметрів. Тоді проекція точки на екран u :

$$\tilde{u} \sim K[t_{cw}]X_w 1, \quad u = \left(\frac{\tilde{u}_x}{\tilde{u}_z}, \frac{\tilde{u}_y}{\tilde{u}_z} \right). \quad (1.1)$$

Стабільність реєстрації характеризується похибкою $\varepsilon_{reg} = |u - \hat{u}|$ (відхилення екранної позиції віртуальної точки від очікуваної). Допустима затримка motion-to-photon τ (час від руху до відображення кадру) має залишатися $< 20\text{--}30$ мс.

Для контролю якості AR-реєстрації визначають ключові **метрики**: похибка реєстрації ε_{reg} , затримка τ , стабільність частоти кадрів ($FPS \geq 30$), якість оцінки освітлення та надійність розуміння сцени.

При розробці алгоритму інтеграції необхідно враховувати **обмеження і ризики** технології. Гладкі, темні, монотонні або дзеркальні поверхні, а також недостатнє чи мерехтливе освітлення – все це погіршує трекінг. Різний рівень підтримки ARCore/ARKit на смартфонах студентів створює ризик “цифрової нерівності”. З точки зору UX, надмірна або складна для розуміння AR-анімація може відволікати від змісту. Також важливі питання безпеки (робота з камерою в аудиторії) – це потребує чітких політик і інструктажу.

Незважаючи на технічні обмеження, дидактичні можливості AR значні. AR забезпечує: просторову візуалізацію складних об'єктів і невидимих процесів; процедурні інструкції з прив'язкою до реальних приладів; безпечно відпрацювання ризикованих експериментів; інтерактивний зворотний зв'язок у процесі навчання. Ці можливості і ляжуть в основу розробки алгоритму інтеграції.

Класифікація AR-сценаріїв для освіти доцільна за механізмом “якоріння” цифрового контенту до реальності, адже цей вибір визначає сценарій діяльності

викладача та студента. Основні типи AR-сценаріїв включають: маркерний AR, безмаркерний AR (визначення площин), геолокаційний AR та AR із розпізнаванням 3D-об'єктів. На практиці часто зустрічаються гібридні поєднання цих підходів:

- Маркерний AR. Додаток розпізнає заздалегідь підготовлене 2D-зображення (маркер) і “якорить” на ньому 3D-модель, відео чи анімацію. Маркером може бути QR-код, сторінка підручника, плакат або спеціальна мітка [14]. Дидактичний фокус: швидке «оживлення» статичних матеріалів, наочне пояснення будови чи принципу дії, подання історичного або контекстного матеріалу. Переваги: низький поріг входження (достатньо навести камеру на маркер), стабільний трекінг, робота навіть на середніх за продуктивністю смартфонах, просте тиражування (маркер можна просто роздрукувати). Обмеження: потрібен фізичний носій (папір, плакат), масштаб контенту залежить від розміру маркера; відблиски чи деформації маркера (паперу) знижують надійність розпізнавання. Типові навчальні кейси: «оживлення» анатомічної картинки в підручнику, демонстрація роботи механізму на плакаті, поява відеофрагментів із правилами безпеки при наведенні камери на знак;
- Безмаркерний AR (plane-based). Додаток через SLAM або сенсори глибини (LiDAR/ToF) знаходить горизонтальні чи вертикальні площини, після чого студент самостійно розміщує 3D-об'єкт у реальному просторі та масштабі. Дидактичний фокус: розвиток просторової уяви, робота з об'єктами у масштабі 1:1, створення «віртуальних лабораторій» чи симуляторів для маніпуляцій. Переваги: реалістичність масштабу, свобода розміщення об'єкта в будь-якій точці простору. Обмеження: потрібні сучасні пристрої з підтримкою ARCore/ARKit; на монотонних або блискучих поверхнях трекінг менш стабільний; є обов'язковий етап «сканування площини», який вимагає попереднього інструктажу студентів. Типові кейси: розміщення 3D-моделі реактора чи двигуна в аудиторії для огляду; демонстрація

біомоделей (наприклад, динозавра) в натуральну величину у дворі навчального закладу;

- Геолокаційний AR (location-based). Контент прив'язується до координат на місцевості (GPS/IMU або VPS – Visual Positioning System). Поза приміщеннями можуть використовуватися хмарні гео-якорі чи технології VPS для прив'язки в міському середовищі. Дидактичний фокус: польові заняття, навчальні екскурсії, краєзнавчі або історичні квести з прив'язкою до реальних локацій, контекстне навчання “на місці події”. Переваги: сильний зв'язок з реальним контекстом і середовищем навчання. Обмеження: залежність від якості GPS та картографічних даних; ненадійність під щільною забудовою; питання приватності місцеположення користувачів. Типові кейси: AR-квест для першокурсників кампусом; екскурсія «Архітектура міста крізь століття» з віртуальними історичними вставками;
- AR з розпізнаванням 3D-об'єктів (object recognition). Найбільш просунутий сценарій: система розпізнає конкретний фізичний об'єкт (наприклад, лабораторний прилад, макет, анатомічний скелет) та накладає підказки, інструкції або схеми працюючих вузлів безпосередньо на нього. Дидактичний фокус: інструктаж «на об'єкті», покрокове відпрацювання процедурних навичок, підтримка навчання техніці безпеки та обслуговування обладнання. Переваги: максимальна контекстність і ефект присутності; крок-за-кроком сценарій із прив'язкою до реального об'єкта зменшує розрив між теорією і практикою. Обмеження: потрібне попереднє «навчання» системи на цьому об'єкті (3D-сканування або фотограмметрія для створення референсної моделі); AR чутлива до змін зовнішнього вигляду об'єкта (знос, наклейки) та вимагає найпотужніших пристроїв для стабільного трекінгу. Типові кейси: покрокові AR-інструкції на реальному осцилографі; віртуальні підсвічені «гарячі зони» в тренажері з техніки безпеки.

Окремий напрям розвитку – колаборативна та персистентна AR (multi-user / persistent AR). Колаборативна AR забезпечує спільну взаємодію кількох користувачів з однією AR-сценою, узгодженою в спільній системі координат, а персистентна AR дозволяє зберігати «просторові якорі» і стан сцени між сесіями. В освітньому процесі це відкриває можливості для групової роботи «навколо» реальних об'єктів (у лабораторії, аудиторії чи на території кампусу).

Технічно така функціональність базується на хмарних чи спільних просторових якорях і вимагає узгодження систем координат та синхронізації стану сцени через мережу (Wi-Fi або інтернет). Освітні сценарії: спільна збірка 3D-моделі групою студентів; лабораторна робота з розподілом ролей («демонстратор», «спостерігач»); командний AR-квест по території з колективним обговоренням знахідок. Переваги: соціальне конструювання знань, розвиток точності просторового мислення. Обмеження: залежність від надійності мережі; дрейф (сповзання) спільних якорних точок на однотонних поверхнях; питання приватності (карта приміщення може вважатися персональними даними). Для успішного впровадження потрібен стабільний Wi-Fi, достатній вільний простір та чіткий дидактичний дизайн із розподілом ролей і короткими циклами активності (5–8 хв активності → 1–2 хв обговорення).

Мінікейс. У курсі «Електроніка» група з 3–4 студентів спільно збирає в AR просторову схему приладового стенду. Викладач попередньо публікує персистентні якорі в аудиторії. «Оператор» розміщує віртуальні модулі, «Аналітик» фіксує покази віртуального мультиметра. Критерії успіху: зібрана схема відповідає технічному завданню, похибка вимірювань < 5%.

Форми реалізації AR за типом пристроїв. При виборі форми AR слід відрізнити дидактичний сценарій (що робить студент) від технічної форми реалізації (на якому обладнанні). Мобільна AR (смартфон/планшет) – найпоширеніша форма (підхід BYOD, швидкий старт), але її мінус – зайняті руки користувача. AR-окуляри/гарнітури (HMD) (наприклад, Microsoft HoloLens) звільняють руки і дають природнішу взаємодію, але дуже дорогі, мають логістичні та гігієнічні проблеми. Такі гарнітури бувають оптичні (OST –

наскрізне бачення реального світу) та відеопроєкційні (VST – повна відеокомпозиція); HMD доцільні для сценаріїв ручних процедур (медичні тренажери тощо). Просторова/проєкційна AR (Spatial AR, проєктор накладає зображення на реальні об'єкти) дозволяє спільну роботу без персональних пристроїв, але є стаціонарною. WebAR (WebXR) – запуск AR у браузері – забезпечує нульову інсталяцію і швидкий доступ (через QR-код), проте має гіршу продуктивність і обмежений доступ до сенсорів.

1.2 Сфери використання та способи впровадження технологій доповненої реальності у вищій освіті

Розвиток технологій доповненої реальності надав закладам вищої освіти якісно нові можливості для організації навчального процесу [12]. Якщо в попередньому пункті було узагальнено сучасні підходи до використання AR в освіті загалом, то доцільно окремо розглянути, де саме доповнена реальність застосовується у вищій освіті та якими способами вона інтегрується у структуру навчальних курсів. Це дозволяє уточнити контекст дослідження, оскільки об'єктом роботи є процеси навчання студентів закладів вищої освіти, а предметом – комплексна інтеграція AR у навчальний процес.

Університетська практика показує, що AR найактивніше впроваджується у тих галузях, де критично важливими є просторове мислення, робота з абстрактними моделями та безпечне відпрацювання практичних навичок [16]. Передусім йдеться про STEM-дисципліни (природничі науки, техніка, інженерія, математика). У курсах фізики, електротехніки, будівельної механіки, інженерної графіки доповнена реальність використовується для візуалізації структур і процесів, які у традиційному форматі подаються у вигляді статичних схем або складних формул. Студенти отримують можливість «накладати» тривимірні моделі механізмів чи електричних схем на реальні об'єкти лабораторного стенду, спостерігати розподіл сил, напружень чи полів у динаміці, змінювати параметри моделі та миттєво бачити наслідки. Це суттєво

полегшує перехід від теоретичних знань до практичного розуміння явищ.

У медичній освіті AR застосовується як інструмент для вивчення анатомії, фізіології та клінічних дисциплін. Студенти можуть взаємодіяти з тривимірними моделями органів, судин, систем організму, накладеними на реальне тіло або манекен, що дозволяє краще зрозуміти їх просторову організацію. У низці університетів доповнена реальність використовується для моделювання хірургічних сценаріїв, процедур догляду за пацієнтами, а також для тренування навичок прийняття клінічних рішень у безпечному середовищі. Особливість таких рішень полягає в тому, що AR не обмежується лише аудиторною демонстрацією: мобільні AR-додатки можуть супроводжувати майбутнього лікаря або медсестру під час практики, підказуючи алгоритми дій, нагадуючи про стандарти або візуалізуючи ризики, що посилює зв'язок між теорією та реальними клінічними ситуаціями.

У гуманітарних та соціальних науках сфери застосування AR також поступово розширюються. Для історичних, культурологічних, археологічних курсів розробляються AR-екскурсії, під час яких студенти, перебуваючи на території кампусу, музею чи міста, за допомогою мобільних пристроїв бачать реконструкції минулих подій, історичних будівель, артефактів у первісному вигляді. У курсах з іноземних мов доповнена реальність використовується для контекстуалізації лексики: прив'язка слів та фраз до реальних об'єктів і ситуацій через мобільний AR-додаток підсилює асоціативну пам'ять, робить вивчення мови більш природним і наближеним до реальної комунікації. Таким чином, AR у вищій освіті не обмежується технічною сферою, а відкриває можливості для формування міждисциплінарних компетентностей, розвитку критичного мислення, емпатії, розуміння культурних контекстів.

Способи впровадження AR у вищій школі доцільно розглядати на двох взаємопов'язаних рівнях – технологічному й дидактичному [9]. На технологічному рівні виділяють передусім мобільні, веборієнтовані, стаціонарні рішення та інтеграцію з навчальними платформами й спеціалізованими AR-

середовищами. Найбільш поширеним є мобільний підхід, коли AR реалізується на смартфонах і планшетах студентів [6]. Це обумовлено високою доступністю мобільних пристроїв, наявністю потужних програмних платформ (ARCore, ARKit, кросплатформні фреймворки на кшталт Unity з AR Foundation), а також можливістю використовувати AR не лише в аудиторії, а й у реальному середовищі – лабораторіях, клініках, музеях, виробничих майданчиках. У межах мобільного підходу широко застосовуються як маркерні сценарії (сканування зображень, плакатів, сторінок підручника), так і безмаркерні (розпізнавання площин, просторове відстеження).

Веборієнтовані рішення (WebAR) набувають актуальності завдяки мінімальним вимогам до користувача: для запуску AR-сцени достатньо сучасного браузера, не потрібно встановлювати додаток. Це дає змогу інтегрувати доповнену реальність у структуру електронних курсів, сторінок університетських сайтів, дистанційних програм. Наприклад, інженерні факультети можуть доповнювати текстові лекційні матеріали інтерактивними 3D-моделями, що запускаються прямо з браузера, а гуманітарні – веб-AR-екскурсіями чи інтерактивними картами. Обмеження WebAR (менший, ніж у нативних додатків, контроль над апаратною частиною, залежність від якості мережі) компенсуються простотою доступу й універсальністю.

Стаціонарні AR-комплекси використовуються у вищій освіті переважно там, де необхідне спеціальне обладнання або групова взаємодія. Прикладами є AR-пісочниці для географії та геології, симуляційні центри з AR-проекціями для медицини, стаціонарні інтерактивні стенди в університетських музеях і навчальних центрах. Такі рішення, як правило, потребують суттєвих інвестицій, але забезпечують високий рівень наочності і можуть обслуговувати великі потоки студентів, що виправдовує їх застосування у базових курсах.

Важливим напрямом є інтеграція AR у системи підтримки навчання (LMS). У цьому випадку доповнена реальність не існує окремо від навчального курсу, а вбудовується у структуру електронних модулів. Студент переходить до

AR-активності безпосередньо з навчального плану або завдання в LMS за посиланням або QR-кодом; результати виконання вправ можуть фіксуватися й аналізуватися у тій самій системі. Така інтеграція сприяє системності використання AR, полегшує моніторинг і дозволяє поєднати традиційні та доповнені форми роботи.

Окреме місце займають спеціалізовані освітні AR-платформи, які надають хмарні засоби для створення, зберігання та спільного використання AR-уроків [13]. На таких платформах університети можуть обмінюватися готовими сценами, адаптувати їх до власних курсів, формувати бібліотеки AR-контенту для різних спеціальностей. Для викладачів, які не є програмістами, платформи з візуальними редакторами спрощують створення AR-сцен на основі шаблонів: це може бути доповнений підручник, AR-плакат, навчальний квест чи віртуальна лабораторна робота. У підсумку технологічний рівень впровадження AR у вищій освіті характеризується багатоваріантністю: заклади комбінують мобільні, веб та стаціонарні рішення, інтегруючи їх у навчальні платформи відповідно до своїх ресурсів і цілей.

На дидактичному рівні виокремлюють кілька концептуальних стратегій впровадження AR, які демонструють різні способи «вбудовування» технології у навчальний досвід. Значущим для медичної освіти є підхід Mobile Augmented Reality Education (MARE) [8], що розглядає мобільну AR не як окремих технічний модуль, а як цілісну освітню екосистему. Модель MARE структурована за трьома рівнями: фундаментальним, функціональним та результативним. На фундаментальному рівні окреслюються теоретичні засади – ситуативне, досвідне та трансформативне навчання – які визначають вимоги до автентичності контексту, значущості досвіду та рефлексії. Це означає, що AR-сценарії мають будуватися не у відриві від реальних професійних ситуацій, а у тісному зв'язку з ними, надаючи студентам можливість безпосередньо «проживати» типові кейси. Функціональний рівень описує, як мобільна AR забезпечує рух студента від знання до практики, тобто які конкретні види

діяльності реалізуються за допомогою AR-додатка: симуляція прийому пацієнта, візуалізація наслідків різних клінічних рішень, підказки в реальному часі тощо. На результативному рівні визначаються цілі навчання і очікувані компетентності, які мають бути досягнуті завдяки використанню AR. У підсумку MARE задає цілісний каркас, у межах якого AR впроваджується як невід’ємна частина професійного середовища студента, а не як додаткова візуалізація до лекцій.

Підхід AR-Quest фокусується на використанні доповненої реальності в форматі квестів та ігрових сценаріїв [10]. Він ґрунтується на ідеях ситуативного навчання та навчання через дослідження. У такій моделі навчальний зміст розподіляється у просторі й часі, а доступ до нього відкривається через послідовність дій, які студент виконує у реальному середовищі з підтримкою AR. Наприклад, у мовній освіті AR-Quest може реалізовуватися у вигляді маршруту по кампусу, де кожна локація «приховує» AR-завдання: при скануванні маркера студент отримує фрагмент діалогу іноземною мовою, лексичне завдання або ситуацію для комунікації. Успішне виконання завдання відкриває наступний етап квесту. Подібна логіка може бути застосована і в інших дисциплінах – історії, географії, культурології, орієнтації першокурсників на території університету [11]. Важливо, що в підході AR-Quest AR не обмежується роллю «ілюстратора» контенту, а перетворюється на ядро навчальної взаємодії: студенти навчаються, виконуючи дії в доповненому середовищі, досліджуючи простір, працюючи в групах. Це посилює мотиваційний компонент, сприяє формуванню навичок співпраці, планування, прийняття рішень.

Третій важливий підхід пов’язаний не стільки з конкретним форматом AR-активності, скільки з процесом її проектування – це Learning Experience Design у поєднанні з Successive Approximation Model (SAM). Learning Experience Design розглядає навчання як комплексний досвід, що включає когнітивний, емоційний і соціальний аспекти. У застосуванні до AR це означає, що дизайнери мають

продумати не лише зміст моделей чи завдань, а й те, як студент входить у AR-сценарій, що він при цьому відчуває, яке навантаження отримує, як відбувається взаємодія з викладачем і одногрупниками. Модель SAM пропонує ітеративний, гнучкий підхід до розробки навчальних рішень: замість лінійного проектування здійснюється серія швидких прототипів, які тестуються на реальних студентах, допрацьовуються з урахуванням зворотного зв'язку і лише потім масштабуються. Стосовно AR це означає, що перші версії AR-модуля можуть бути доволі простими, але завдяки багаторазовому уточненню вони краще відповідають реальним потребам студентів і специфіці курсу. Такий підхід знижує ризики невдалого впровадження, коли складний AR-додаток створюється «в один етап» і виявляється важким у використанні або педагогічно неефективним.

Порівнюючи зазначені стратегії з більш традиційними, можна побачити їхні спільні риси й відмінності. Спільним є те, що всі вони виходять із пріоритету педагогічної доцільності над технологічною новизною: AR розглядається як інструмент реалізації певної методики (ситуативне, досвідне, дослідницьке, ігрове навчання, проектне навчання), а не як самоціль. Відмінності полягають у фокусі. MARE орієнтована на мобільну AR у професійно-практичному контексті, підкреслюючи включення AR у реальні робочі ситуації студентів і майбутніх фахівців. AR-Quest акцентує на квестових, просторово розподілених сценаріях і застосовується там, де важливі мотивація, дослідження середовища, контекстуалізація знань. Learning Experience Design[20] у поєднанні з Successive Approximation Model [19] фокусується на процесі: він задає рамку, в якій можна реалізувати як підхід MARE, так і квестову логіку, забезпечуючи ітеративну перевірку й удосконалення AR-рішень [21]. На відміну від фрагментарних практик, коли AR додають до курсу як разовий «ефектний» елемент, такі стратегії дозволяють будувати системну, повторювану інтеграцію доповненої реальності.

Таким чином, аналіз сфер використання та способів впровадження AR у вищій освіті показує, що сучасні університети мають широкий спектр як

технологічних, так і дидактичних інструментів. Водночас значна частина описаних у літературі підходів стосується окремих курсів або локальних моделей. Це підкреслює актуальність завдання даної дипломної роботи – розробити алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес, який би узагальнював напрацьовані практики, враховував ролі учасників, етапи й умови впровадження та дозволяв цілеспрямовано підвищувати ефективність сприйняття навчального матеріалу на теоретичних і практичних заняттях.

1.3 Педагогічні основи та дидактичний потенціал AR

Дидактичні функції AR у навчальному процесі

AR корисна там, де потрібно: візуалізувати «невидиме» або дуже складне; безпечно відпрацювати дію на реальному чи макетному об'єкті; прив'язати теоретичні знання до конкретного місця чи середовища. Формулюючи дидактичні функції AR та їх метрики, ми дотримуємося принципу фіксації тріади «мета – завдання – результат» із відповідними показниками оцінювання (як це прийнято у навчальних планах і презентаціях під час захисту кваліфікаційних робіт).

Основні дидактичні функції AR та приклади їх реалізації:

Наочність (використання 3D-моделей, візуалізація «процесів у розрізі»). Ця функція AR перетворює абстрактні просторові відношення на маніпульовані 3D-моделі. Вона дає можливість розбирати об'єкти на складові, демонструвати перерізи та візуалізувати внутрішні механізми або процеси. Особливо корисна для анатомії, геометрії, будови приладів чи електронних схем. Коли вмикати: коли ключову роль відіграє просторове мислення і розташування елементів, а статична картинка чи відео не дають повного розуміння.

Приклад сценарію (5–8 хв): студент розміщує 3D-модель на столі, оглядає її з трьох стандартних ракурсів, виконує прості маніпуляції (вмикає/вимикає шари, показує переріз) і фіксує висновки скріншотом з власними підписами.

Метрики успішності: точність відповіді на 2–3 просторові запитання; час до отримання правильної відповіді; кількість перемикачів шарів до моменту, коли знайдено «усвідомлений» ракурс. Вимоги до дизайну: мінімізувати перевантаження інтерфейсу (мінімум елементів керування). Мінімальні умови: стабільне освітлення, контрастна площина для трекінгу, офлайн-кеш моделі.

Керована практика (інструкції «крок за кроком»). AR забезпечує безпечно відпрацювання процедури на реальному об'єкті або його прототипі через позиційні підказки, контроль правильності кроків і фіксацію «м'яких» помилок без фізичного ризику. Коли вмикати: якщо важлива точна послідовність дій, безпека та акуратність (наприклад, лабораторні процедури, налаштування обладнання, техніка безпеки).

Приклад сценарію (8–12 хв): цикл «інструкція → дія → перевірка». AR підсвічує потрібний регулятор або порт на обладнанні, стежить за правильністю його налаштування, запитує підтвердження виконання і переходить до наступного кроку. Наприкінці автоматично формується чек-лист виконаних дій. Метрики: частка правильно виконаних кроків з першої спроби; кількість повторів; загальний час виконання; нульова кількість критичних помилок. Вимоги: індикатори (підсвітки, стрілки) мають бути очевидними; обов'язково підготовлений резервний «план Б» (наприклад, PDF-інструкція). Технічні умови: стабільний трекінг 3D-об'єкта або площини, відсутність блискучих поверхонь на реальному об'єкті.

Контекстуалізація (прив'язка знань до місця або середовища). Ця функція пояснює студенту «де і навіщо це потрібно у реальному світі», накладаючи інформаційні підказки на реальне середовище, маршрути чи об'єкти в полі. Коли вмикати: під час польових завдань, екскурсій, кейсів на місцевості, де важливі реальне оточення, географія або специфічне середовище.

Приклад сценарію (5–10 хв): геолокаційний AR-квест. Студент проходить маршрут з 3 точок; у кожній точці через AR-накладку отримує коротку підказку чи спостереження, відповідає на контрольне запитання та робить фото-артефакт

(наприклад, фото об'єкта з AR-позначками). Метрики: завершення маршруту (всі точки пройдено); точність відповідей; якість фото-артефактів (оцінена за рубрикатором). Вимоги: контент має бути змістовним, а не зводиться до «полювання на маркери»; обов'язково забезпечено офлайн-кеш контенту. Технічні умови: наявність GPS/GLONASS; дотримання правил безпеки при русі зі смартфоном.

Мотивація та залучення (ефект присутності, wow-ефект). AR може слугувати коротким «прологом» до теми, формуючи інтерес і початкову гіпотезу у студентів. Ефект присутності полегшує старт роботи і підвищує внутрішню мотивацію. Коли вмикати: на початку вивчення теми або перед складним теоретичним блоком, щоб зацікавити і налаштувати студентів на активність.

Приклад сценарію (3–5 хв): “тизер” теми. Студент через AR бачить вражаюче явище або результат експерименту і формулює гіпотезу, яку потім перевірятиме на занятті. Метрики: результати короткого опитування про інтерес (до і після візуалізації); частка студентів, що добровільно висловили свої гіпотези; кількість сформульованих припущень. Вимоги: не розтягувати цей етап і не підміняти зміст навчання «вау-ефектом»; після AR-прологу відразу переходити до активного навчального завдання.

Рефлексія й оцінювання (повторне програвання, самооцінка). Ця функція дозволяє студентам «прокрутити» виконаний AR-сценарій і проаналізувати свої помилки чи успіхи, тим самим переводячи досвід у знання. Коли вмикати: наприкінці AR-епізоду, перед підсумковим обговоренням.

Приклад сценарію (5–7 хв): студент переглядає журнал (лог) своїх кроків у AR, робить два скріншоти «було/стало» і відповідає на контрольне запитання: «Як поясниш цей процес без моделі?». Метрики: час виконання повторного програвання; точність (частка правильно виконаних кроків чи вимірювань при повторі); якість пояснення процесу без AR (за рубрикатором); самооцінка впевненості до і після повтору.

Узгодження функцій з типами AR та ролями. На практиці ці дидактичні функції, рекомендовані типи AR та ролі учасників доцільно звести в єдину матрицю (див. табл. 1.1). Такий зріз «функція → метрики → ролі» корелює з логікою подачі “мета/об’єкт/предмет” і “результати/висновки” та полегшує формування навчальних матеріалів (наприклад, слайдів захисту, розділу «Висновки» тощо).

Таблиця 1.1

Матриця відповідності дидактичних функцій AR, типів сценаріїв та ролей учасників

Функція	Рекомендований тип AR	Місце в занятті	Ролі та артефакти
Наочність	Маркерний / Безмаркерний (площини)	«Ядро» пояснення (5–8 хв)	<ul style="list-style-type: none"> • Викладач: ставить проблемні запитання. • Студент: виконує 1–2 маніпуляції та робить скріншот. • Розробник: готує оптимізовану 3D-модель.
Керована практика	Розпізнавання 3D-об’єктів	Практика / Лабораторна (8–12 хв)	<ul style="list-style-type: none"> • Викладач: контролює таймінг і безпеку. • Студент: виконує кроки процедури. • Методист: готує критерії успіху та чек-лист.
Контекстуалізація	Геолокаційний	Польові / Екскурсійні (5–10 хв)	<ul style="list-style-type: none"> • Викладач: ставить завдання на місцевості. • Студент: збирає фото-артефакти. • Методист: готує рубрикатор оцінювання.
Мотивація	Маркерний / Безмаркерний («тізер»)	Старт теми (3–5 хв)	<ul style="list-style-type: none"> • Викладач: формулює гіпотезу. • Студент: дає коротку відповідь (реакцію)
Рефлексія / Оцінювання	Будь-який	Дебрифінг (5–7 хв)	<ul style="list-style-type: none"> • Викладач: оцінює роботу за рубрикатором. • Студент: надає скріншот + міні-пояснення. • Розробник: забезпечує експорт логу дій.

1.4 Потреби навчального процесу, що зумовлюють необхідність розроблення алгоритму комплексної інтеграції AR з перевіркою доцільності

Аналіз сучасних підходів до використання технологій доповненої реальності в освіті, а також сфер і способів їх впровадження у вищій школі показує, що AR вже не сприймається як «екзотична» новинка, а розглядається як реальний інструмент підсилення навчального процесу. Водночас у практиці закладів вищої освіти її застосування здебільшого залишається фрагментарним, прив'язаним до окремих курсів, ентузіастів або пілотних проектів. Для переходу до системного, відтворюваного використання AR недостатньо лише усвідомити, які потреби навчального процесу вона здатна підтримати; необхідно також мати формалізований механізм перевірки доцільності її застосування в кожному конкретному випадку. Саме поєднання аналізу потреб і процедури перевірки доцільності зумовлює необхідність розроблення спеціального алгоритму комплексної інтеграції доповненої реальності.

Передусім для навчання студентів закладів вищої освіти характерна висока складність теоретичного матеріалу. Студенти працюють з абстрактними поняттями, багаторівневими моделями, невидимими процесами – від квантових ефектів і електромагнітних полів до внутрішньої будови організму чи багатокomпонентних технічних систем. За таких умов істотно зростає когнітивне навантаження: значна частина зусиль витрачається не стільки на осмислення суті явища, скільки на побудову уявних образів, які його репрезентують. Доповнена реальність здатна частково зняти цю напругу, переводячи складні структури у тривимірний простір, «вбудований» у звичне оточення студента. Однак сама наявність AR ще не означає автоматичного покращення сприйняття. Для одних тем візуалізація в доповненій реальності дійсно критично важлива (наприклад, просторове розташування анатомічних структур), а для інших достатньо статичних схем або інтерактивних 2D-моделей. Без процедури попередньої перевірки доцільності викладач ризикує або не використати AR там, де вона найбільш потрібна, або навпаки – перевантажити курс надмірною візуалізацією,

що не дає доданої педагогічної цінності. Отже, вже на рівні теоретичних дисциплін виникає потреба не лише в технології візуалізації, а й у формалізованому рішенні: як визначити, для яких концептів AR є обґрунтовано доцільною, а де її застосування буде надмірним.

Другою ключовою потребою сучасної вищої освіти є посилення практичної та професійної підготовки студентів, особливо там, де реальні тренування пов'язані з ризиками, обмеженим доступом до обладнання або високою вартістю ресурсів. У природничо-наукових, технічних та медичних спеціальностях необхідно відпрацьовувати процедури, що вимагають точності й безпеки: хімічні експерименти, робота з електроустановками, клінічні маніпуляції тощо. AR-технології дозволяють створювати тренажери та симуляційні середовища, де студент може багаторазово повторювати дії, експериментувати з різними сценаріями, не ризикуючи здоров'ям пацієнта чи збереженістю дорогого обладнання. Водночас розроблення такого AR-тренажера потребує значних ресурсів, а не всі навички однаково виграють від перенесення в доповнену реальність. У низці випадків достатньо відеодемонстрації або низьковартісної фізичної моделі; в інших – AR-сценарій дасть критичну перевагу. Саме тому виникає потреба не лише констатувати потенціал AR як тренажера, а й забезпечити системну перевірку доцільності: зважити, чи виправдовують очікувані дидактичні вигоди витрати на розробку, чи не дублюють AR-процедури уже наявні засоби, чи дійсно зменшуються ризики й підвищується доступність практичних вправ. Без такого попереднього «фільтру» легко отримати дорогий, але малоефективний чи слабо використовуваний AR-ресурс.

Ще одна важлива потреба пов'язана з мотиваційно-емоційним виміром навчання. Сучасні студенти звикли до інтерактивних, мультимедійних, гейміфікованих форматів, але значна частина університетських курсів досі вибудована навколо традиційних лекцій і конспектування. AR дає змогу перетворити заняття на послідовність дій у доповненому середовищі, де студент не лише спостерігає, а й досліджує, взаємодіє, приймає рішення. Проте, якщо

кожну тему курсів починати супроводжувати AR-квестами або ігровими сценами, виникає ризик розмивання фокусу: технологія починає домінувати над змістом, а мотивація переноситься з пізнавальної на суто розважальну площину. Отже, мотиваційна потреба також вимагає механізму перевірки доцільності: необхідно вміти відрізнити ті теми й ситуації, де гейміфікований AR-сценарій є оптимальним способом залучення (наприклад, вступні модулі, міждисциплінарні проекти, орієнтація в просторі кампусу), від таких, де він може відволікати від глибинного опрацювання змісту. Без такої перевірки впровадження AR легко перетворюється на «полігон ефектів», не підкріплених навчальними результатами.

Сучасний вищий навчальний процес дедалі більше орієнтується на студент-центризм, індивідуальні освітні траєкторії та формувальне оцінювання. Студенти приходять до ЗВО з різним рівнем попередньої підготовки, відмінними стилями мислення, темпом навчання, що вимагає гнучких механізмів підтримки й зворотного зв'язку. AR потенційно може стати одним із інструментів такої підтримки: вона дозволяє організувати адаптивні сценарії (додаткові підказки для тих, хто помиляється; ускладнені завдання для тих, хто швидко просувається), збирати дані про дії студента в AR-середовищі, надавати миттєвий візуальний і текстовий зворотний зв'язок. Водночас не кожний курс і не кожна група студентів потребують розгалужених адаптивних AR-сценаріїв: іноді достатньо традиційних форм формувального оцінювання. Це знову ставить питання про доцільність: де AR дійсно посилює персоналізацію, а де її використання створює лишню складність без істотного ефекту. Без алгоритмічно заданої перевірки викладачеві важко приймати такі рішення послідовно й обґрунтовано.

Організаційно-технологічний вимір навчального процесу також формує специфічні потреби. Заклади вищої освіти мають обмежені бюджети, неоднорідну матеріально-технічну базу, різний рівень цифрової компетентності персоналу. AR-ініціативи, що виникають «знизу», часто залежать від ентузіазму окремих викладачів або грантової підтримки і не завжди масштабуються на

рівень факультету чи університету. В таких умовах будь-яке рішення про впровадження доповненої реальності повинно проходити неформальну, а системну перевірку на доцільність з погляду ресурсів, підтримки, життєвого циклу. Питання «чи варто впроваджувати AR?» має розкладатися на низку підпитань: чи є у студентів потрібні пристрої, чи підтримує наявна ІТ-інфраструктура вибрану платформу, хто відповідатиме за супровід і оновлення контенту, як інтегрувати AR-компонент у наявну LMS, які альтернативи існують і чому AR перевершує їх у даному контексті. Без алгоритмізованої процедури такої перевірки рішення часто приймаються інтуїтивно, що веде або до завищених очікувань і розчарувань, або до надмірної обережності й відмови від потенційно корисних інновацій [18].

Аналіз існуючих фреймворків – Mobile Augmented Reality Education, AR-Quest, Learning Experience Design у поєднанні з Successive Approximation Model – показує, що вони фокусуються переважно на педагогічному та методичному дизайні AR-сценаріїв для конкретних контекстів (медична практика, мовні квести, онлайн-курси). Вони пропонують цінні підходи до побудови навчальних ситуацій, але майже не описують системну процедуру попередньої перевірки доцільності впровадження AR у межах конкретної дисципліни, факультету чи ЗВО. Поза увагою часто лишається питання: як уніфіковано вирішити, де AR потрібна, а де ні; які критерії застосувати до різних дисциплін; як зіставити педагогічний ефект, ресурсні витрати й організаційні обмеження. У результаті навіть якісно с проєктовані AR-сценарії залишаються поодинокими і не трансформуються в елемент комплексної стратегії закладу.

Ці прогалини стають очевидними, якщо співвіднести їх із метою та завданнями даної дипломної роботи. Мета дослідження полягає в підвищенні ефективності сприйняття навчального матеріалу на теоретичних і практичних заняттях шляхом застосування комплексної інтеграції технології доповненої реальності в освітній процес. Серед завдань окремо виділено як аналіз сучасних підходів, так і формування критеріїв доцільності інтеграції AR, розроблення алгоритму комплексної інтеграції, визначення ролей учасників та оцінювання

сприйняття матеріалу з AR і без неї. Це означає, що в центрі уваги роботи – не лише опис можливостей AR, а й розроблення процедурного механізму, який би дозволяв перевіряти доцільність її застосування до конкретного навчального контексту, а вже потім – планувати й реалізовувати інтеграцію.

Отже, потреби навчального процесу у вищій освіті – підвищення наочності та зрозумілості складних теоретичних концепцій, розширення можливостей безпечної практичної підготовки, підсилення мотивації та залученості студентів, підтримка персоналізованих траєкторій і врахування організаційно-ресурсних обмежень – лише частково й випадково задовольняються наявними AR-практиками. Відсутність системного підходу з обов’язковою перевіркою доцільності призводить до того, що доповнена реальність або використовується точково, без гарантованого освітнього ефекту, або взагалі залишається нереалізованим потенціалом. Саме це обґрунтовує необхідність розроблення спеціалізованого алгоритму комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес, у якому перевірка доцільності виступатиме окремим і обов’язковим етапом. Такий алгоритм, спираючись на проаналізовані моделі та виявлені потреби, має формалізувати послідовність дій, ролі учасників, умови активації AR-компонентів і механізми повернення до попередніх кроків, забезпечуючи системність, відтворюваність та підконтрольність підвищення ефективності сприйняття навчального матеріалу.

1.5 Висновки дослідження підходів до інтеграції AR

У попередніх підпунктах розділу було узагальнено технологічні основи мобільної доповненої реальності (ARCore/ARKit, механізми трекінгу та 3D-реєстрації), класифікацію AR-сценаріїв для освіти, сфери використання AR у вищій школі та типові способи її впровадження (мобільні додатки, WebAR, стаціонарні рішення, інтеграція в LMS). Окремо проаналізовано педагогічні моделі MARE, ARQuest, підхід Learning Experience Design у поєднанні з SAM та показано, що вони фокусуються переважно на дизайні локальних AR-активностей для окремих курсів

або контекстів.

Дослідження дидактичних функцій AR (наочність, керована практика, контекстуалізація, мотивація, рефлексія) та потреб навчального процесу у закладах вищої освіти засвідчило, що потенціал AR полягає у зменшенні когнітивного навантаження, підсиленні практичної складової, підвищенні мотивації студентів та підтримці персоналізованих траєкторій навчання [7]. Водночас у реальній практиці університетів AR використовується фрагментарно, переважно як разові демонстрації або пілотні проєкти, що залежать від ентузіазму окремих викладачів і не масштабуються на рівень освітніх програм.

Проаналізовані підходи не забезпечують відповіді на низку ключових питань: де саме у структурі курсу використання AR є педагогічно доцільним; за яких технічних, фінансових та кадрових умов таке впровадження є реалістичним; хто з учасників процесу (викладач, розробник, адміністрація, студенти) за що відповідає; які проміжні артефакти повинні створюватися на кожному етапі. У наявних моделях відсутня формалізована процедура попередньої перевірки доцільності використання AR для конкретної дисципліни, а також немає описаної послідовності кроків, що дозволяла б відтворювано інтегрувати AR у навчальний процес різних курсів.

Отже, проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що для переходу від поодиноких AR-рішень до системного використання доповненої реальності у вищій освіті необхідно розробити спеціальний алгоритм комплексної інтеграції. Такий алгоритм має усунути виявлені обмеження існуючих підходів, формалізувати критерії та процедуру попередньої перевірки доцільності, задати чіткий поділ ролей учасників (викладач, розробник, методист, адміністрація, студенти) та визначити послідовність етапів впровадження AR-компонентів у навчальний процес. Таким чином, результатом дослідницької частини є обґрунтування необхідності створення алгоритму комплексної інтеграції AR, який усуває виявлені обмеження існуючих підходів та реалізує формалізовану перевірку доцільності, чіткий поділ ролей учасників та послідовність етапів впровадження.

2 АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

2.1 Опис алгоритму інтеграції AR

Для досягнення мети роботи необхідно не просто додати AR до курсу, а запропонувати відтворюваний алгоритм, який поєднує педагогічні, організаційні та технічні кроки, визначає ролі учасників, породжує конкретні артефакти (документи, програмні компоненти) і містить вбудовані точки контролю якості.

Алгоритм має сім послідовних етапів. Структура та послідовність цих етапів алгоритму подано на рисунку 2.1.

1. Аналіз доцільності інтеграції AR, де ключова роль належить викладачу як предметному експерту; Викладач, спираючись на специфіку дисципліни, виділяє теми, де студенти традиційно мають труднощі (абстрактність понять, складні просторові уявлення, алгоритмічні кроки тощо).

Ці дані передаються в модель оцінки доцільності впровадження AR. На основі набору критеріїв (потенціал візуалізації, частота помилок, доступність обладнання, готовність викладача працювати з AR, обмеження часу на занятті тощо) застосунок обчислює показник доцільності.

Якщо значення індексу нижче порогового значення, AR вважається недоцільною для даної теми: алгоритм завершується, а курс реалізується у традиційному форматі. Якщо ж індекс перевищує поріг, приймається рішення рухатися далі.

Основним артефактом етапу є заповнена форма оцінювання та звіт про доцільність, що фіксує значення індексу доцільності і обґрунтовує подальші дії.

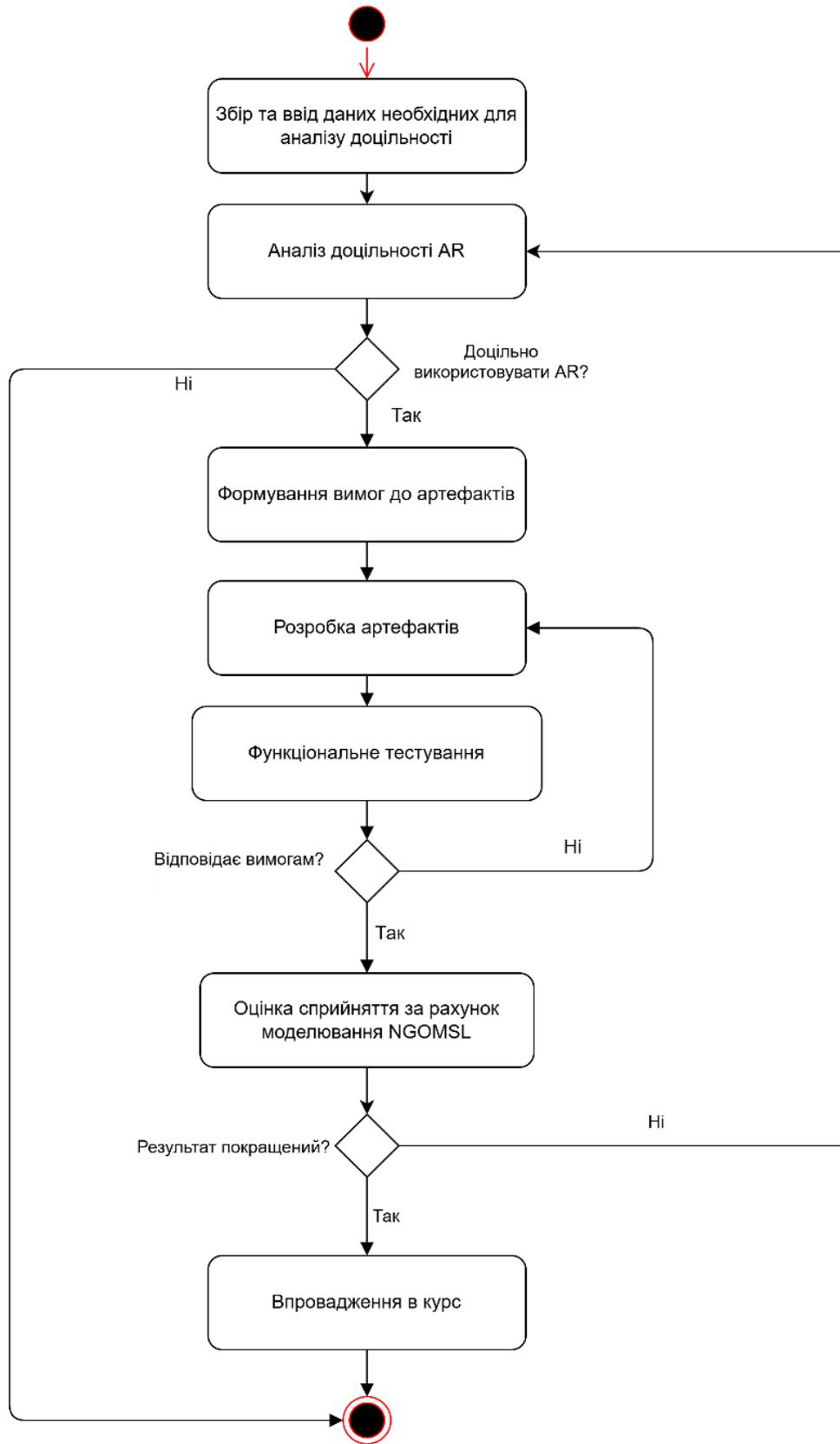


Рис. 2.1 Алгоритм комплексної інтеграції AR.

2. Формулювання вимог де викладач детально описує, яке саме навчальне завдання має підтримувати AR-компонент, які результати навчання повинні бути досягнуті і на якому етапі заняття буде використовуватися доповнена реальність.

На кроці формування вимог він формулює педагогічні потреби: які об'єкти потрібно візуалізувати (3D-модель графіка, схема алгоритму, структура об'єкта), які дії мають виконувати студенти (огляд моделі, зміна параметрів, виконання кроків алгоритму), яку інформацію слід підсвічувати або коментувати в AR. Результатом стає документ із педагогічними вимогами та сценарієм уроку: текстовий опис етапів заняття, перелік необхідних AR-сцен, вимоги до підказок і навігації.

На основі цього документа разом із розробником формується технічне завдання: фіксується список AR-артефактів (3D-моделі, маркери, текстури, аудіопідказки), перелік функцій застосунку, платформи (Android / iOS), обмеження продуктивності. Саме ці документи - сценарій використання AR та технічне завдання - є головними артефактами другого етапу.

3. Розробка застосунків та AR-артефактів, де основну роботу виконує розробник програмного забезпечення. Спираючись на технічне завдання, він реалізує AR-застосунок (наприклад, у середовищі Unity з використанням AR Foundation) і створює або інтегрує 3D-моделі, налаштовує розпізнавання маркерів, обробку жестів, відображення підказок. На цьому ж етапі формується структура даних, конфігураційні файли (опис сцен, параметрів завдань, варіантів підсвітки), проводиться базове внутрішнє тестування розробником. Важливо, що викладач не зникає з процесу: він періодично переглядає проміжні збірки, перевіряє відповідність навчальному змісту, уточнює формулювання підказок. До артефактів етапу належать: робочий прототип AR-застосунку, набір AR-артефактів (3D-моделі, маркери, текстури), а також коротка технічна документація та інструкція для викладача

4. Функціональне тестування викладачем яке відбувається коли прототип готовий. Викладач проводить цільове функціональне тестування з позиції майбутнього користувача на занятті. Він програє весь сценарій уроку «від і до»:

встановлення та запуск застосунку, проєкція AR-об'єктів, виконання студентом усіх кроків завдання. Фактично це репетиція заняття без реальних студентів. Під час тестування викладач фіксує всі помилки і недоліки: технічні (падіння застосунку, проблеми з трекінгом, некоректне масштабування моделі) і методичні (плутанина в підказках, надлишок інформації на екрані, незрозумілі позначення). Результат оформлюється у вигляді протоколу тестування та списку до-опрацювань, який передається розробнику. Якщо критичних проблем багато, етап 3 і 4 повторюються кілька разів, поки викладач не підтвердить, що функціональність відповідає сформованим раніше вимогам.

5. Остаточне налаштування, яке відбувається після усунення виявлених недоліків. Розробник готує версію застосунку, яка максимально наближена до фінальної. Разом із викладачем проводиться уточнення всіх параметрів, здатних вплинути на досвід студентів під час реального заняття: розміщення AR-об'єктів у просторі аудиторії, масштаб і орієнтація моделей, затримки перед появою підказок, рівень деталізації, мова інтерфейсу, режим роботи з обмеженою кількістю пристроїв тощо.

За підсумками цього етапу формуються дві важливі групи артефактів: стабільна збірка застосунку, тобто версія рекомендована до використання на заняттях, та методичні матеріали для викладача: чек-лист підготовки техніки, покрокова інструкція проведення заняття, опис типових проблем і способів їх вирішення.

6. Далі здійснюється аналітичне моделювання сценаріїв виконання цього завдання у двох варіантах: без AR та з AR. Якщо за результатами аналізу демонструється зменшення ментального навантаження, скорочення часу виконання або зниження кількості помилок, позитивні відгуки студентів, етап вважається успішним.

Якщо ж ефект від AR незначний або негативний, алгоритм передбачає повернення до першого етапу з новими вхідними даними: переглядається доцільність саме такого формату AR, відбувається уточнення освітніх цілей та вимог, починається новий цикл розробки або відмова від AR для цієї теми.

В майбутньому під час реального заняття можна зібрати поведінкові дані (фактичний час виконання, кількість помилок, кількість звернень до підказок) і суб'єктивні оцінки студентів щодо зрозумілості та зручності роботи. Порівняння результатів аналітичного моделювання з реальними показниками дозволить зробити висновок про те, наскільки сценарій з AR справді знижує когнітивне навантаження та покращує сприйняття навчального матеріалу порівняно з традиційним варіантом.

7. Порівняння математичного моделювання роботи з та без AR підтверджує перевагу та доцільність застосування AR, розпочинається повноцінне впровадження. Викладач інтегрує AR-активності в робочу програму дисципліни: вносить зміни до тематичного плану, описує AR-завдання у методичних вказівках для студентів, оновлює завдання лабораторних і практичних робіт. За участю адміністрації й технічної служби забезпечується доступність пристроїв (смартфонів, планшетів), організовується розгортання застосунку на кафедральних або студентських пристроях, налаштовується доступ до інструкцій через LMS. На цьому етапі виникають фінальні артефакти: оновлена робоча програма дисципліни, пакет навчально-методичних матеріалів із описом AR-компонента, посилання на застосунок у навчальній системі, чек-листи для технічної підтримки.

При цьому впровадження не означає завершення життєвого циклу алгоритму. У процесі використання AR-компонента викладач продовжує збирати дані про успішність студентів і якість сприйняття матеріалу; за потреби може бути повторно запущено четвертий–шостий етапи. Таким чином, запропонований алгоритм не лише дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо впровадження AR, але й підтримує циклічне покращення AR-компонентів, орієнтоване на головну мету – стале підвищення ефективності сприйняття навчального матеріалу студентами

Узагальнюючи попередній опис, можна сказати, що запропонований алгоритм поєднує формальну оцінку доцільності, вимоги викладача до конкретного уроку, дії розробника та перевірку результату на реальних студентах. Саме через проходження цих кроків реалізується головна мета роботи – підвищення сприйняття навчального матеріалу під час навчання студентів закладів вищої

освіти шляхом застосування алгоритму комплексної інтеграції технології доповненої реальності в освітній процес.

Важливо, що кожен етап алгоритму не існує сам по собі, а породжує проміжні артефакти (модель доцільності, вимоги до AR-застосунку, прототип, результати функціонального тестування, метрики), які використовуються на наступних кроках.

Учасники процесу – викладач, розробник і студенти, утворюють замкнений цикл зворотного зв'язку: викладач формує запит і перевіряє результат, розробник матеріалізує цей запит у вигляді AR-артефактів, математичне моделювання дозволяє перевірити, чи справді новий варіант уроку може покращити сприйняття матеріалу. Якщо цього не відбувається, алгоритм передбачає повернення назад – аж до повторного аналізу доцільності.

Послідовність обміну повідомленнями між основними учасниками алгоритму проілюстровано на діаграмі послідовності (див. рис. 2.2).

2.2 Формула індексу доцільності застосування AR у курсі

Для обґрунтування доцільності впровадження технології доповненої реальності (AR) в навчання розроблено математичну модель з багатьма критеріями. Модель передбачає оцінювання ключових аспектів інтеграції AR за допомогою опитувальника, де експерти (наприклад, викладачі або методисти) оцінюють низку критеріїв. Критерії згруповано в п'ять основних категорій, що охоплюють педагогічну ефективність, технічну готовність, фінансові фактори, кадрово-організаційні умови та контент/інтеграцію. Всі критерії оцінюються на шкалі від 1 до 5 балів, де 1 означає мінімальну відповідність або наявність серйозних проблем, а 5 – максимальну відповідність критерію або повну готовність (3 бали при цьому відповідає середньому рівню).

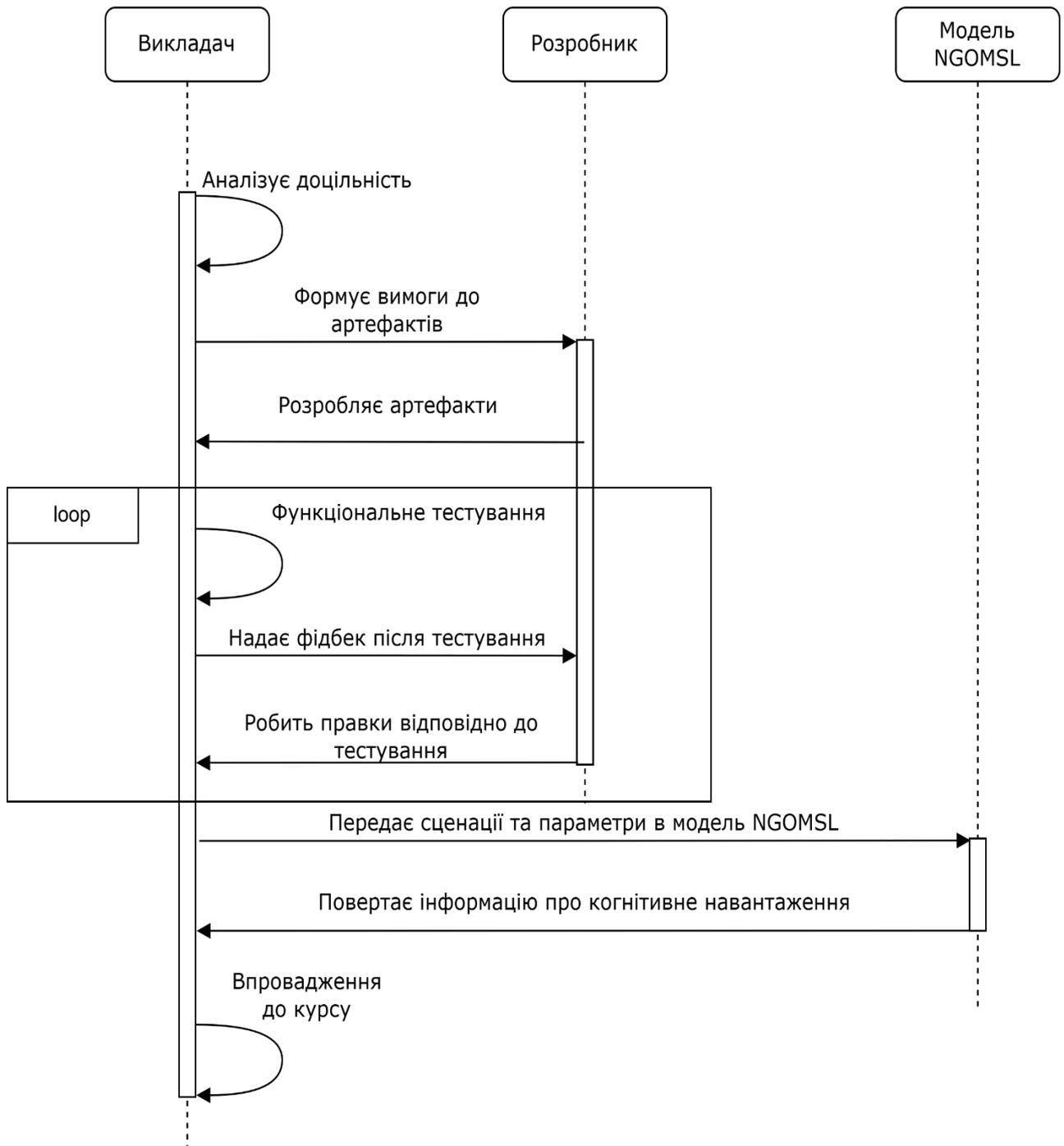


Рис. 2.2 Діаграма послідовності взаємодії ролей в алгоритмі інтеграції AR.

Нижче наведено групи критеріїв із відповідними запитаннями опитувальника, а також описано методику розрахунку показника доцільності з урахуванням вагових коефіцієнтів, логічних обмежень та штрафів.

Запитання для оцінювання: (оцініть ступінь згоди з кожним твердженням, 1 – категорично не згоден/незадовільно, 5 – повністю згоден/відмінно).

1. Освітня ефективність та мотивація:

- AR може покращити сприйняття складних понять і матеріалу у даному навчальному курсі?
- AR може гармонійно доповнити методи навчання, та посприяти досягненню запланованих результатів?

2. Технічна готовність інфраструктури:

- у розпорядженні навчального закладу або студентів є достатня кількість пристроїв, сумісних з AR для всіх учасників навчального процесу?;
- чи є вся можлива необхідна інфраструктура? Наявність інтернет-з'єднання, бездротове з'єднання досить швидке, тощо;
- наявні пристрої сумісні з актуальними технологіями та програмним забезпеченням що активно використовується в AR? Як приклад LIDAR, можливість зчитувати QR коди камерою, тощо;
- чи є доступ до кваліфікованої технічної підтримки - фахівців, які можуть встановити, налаштувати та усунути проблеми AR-застосунків?;

3. Фінансові та ресурсні можливості:

- бюджет обладнання: наш бюджет дозволяє придбати або залучити необхідні пристрої та обладнання для AR (камери, маркери, гарнітури тощо) без критичного скорочення інших статей витрат?;
- чи дозволяє бюджет придбати або залучити недостатні, але необхідні пристрої та обладнання для AR?;
- чи дозволяє бюджет придбати недостатнє програмне забезпечення?;
- чи дозволяють часові рамки розробки курсу та навчального плану виділити час для розробки AR-контенту?;
- чи виправдовує очікувана вартість впровадження AR можливе очікуване підвищення ефективності засвоєння інформації?;

4. Кадрова та організаційна готовність:

- чи мають викладачі досвід використання AR та досвід планування навчального процесу з його використанням?;
- чи зацікавлені викладачі у спробах впровадження AR в освітні процеси?;

- чи зацікавлені студенти у використанні AR в навчальних процесах?;

5. Навчальний контент та інтеграція:

- чи існують вже готові AR застосунки та матеріали які можна використати для його впровадження?;
- чи є можливість створювати та планувати власний AR-контент у разі відсутності вже готового?;
- чи вистачить часу в занятті для використання AR?;
- Методика оцінювання і шкала балів.
- Для кожного з наведених критеріїв експерт(и) виставляють оцінку від 1 до 4 балів за результатами аналізу умов впровадження AR. Шкала 1–5 інтерпретується наступним чином:
 - 1 бал – критерій майже не виконаний, наявні серйозні перешкоди або категорична незгода з позитивним твердженням;
 - 3 бали – середній рівень, критерій частково виконаний або виконаний на прийнятному рівні;
 - 5 балів – критерій повністю задоволений, повна згода з твердженням про готовність/доцільність.

Важливо, щоб оцінювачі керувалися об'єктивними даними: наприклад, на 1 бал слід оцінювати фінансовий критерій, якщо коштів явно бракує, а на 5 балів – якщо фінансування вже виділено в достатньому обсязі. Аналогічно, 1 бал за технічним критерієм вказуватимуть на відсутність або мінімум необхідної техніки, тоді як 5 балів – що вся потрібна інфраструктура готова і протестована, тощо. Таким чином, перед заповненням опитувальника слід визначити фактичний стан кожного аспекту і провести співвідношення його з градаціями шкали (мінімальний – середній – максимальний рівень). Якщо оцінювання здійснюють кілька експертів (наприклад, кілька викладачів), можна розрахувати середній бал за кожним питанням для подальшого використання в моделі.

Вагові коефіцієнти критеріїв

Не всі категорії впливу однаково значущі для остаточного рішення – тому в моделі передбачено індивідуальні ваги для кожної групи критеріїв. Вагові

коефіцієнти можна налаштовувати під конкретний контекст, специфіку закладу чи проекту, але доцільно запропонувати базовий набір ваг. Основні пропоновані ваги (сума = 1, тобто 100% впливу) для п'яти категорій такі:

- Освітня ефективність та мотивація: 0.25 (25% впливу) – найбільш вагома категорія, адже основна мета впровадження AR – підвищити якість навчання. Якщо AR не дає педагогічного ефекту, інші фактори втрачають сенс.
- Технічна готовність: 0.20 (20%) – критично важливо мати необхідну технічну базу; без цього впровадження неможливе, тому категорія має високий пріоритет.
- Фінансові та ресурсні можливості: 0.15 (15%) – фінанси теж важливі, але припускаємо, що за наявності високої педагогічної цінності можуть бути знайдені додаткові ресурси або гранти. Тому вага дещо менша, хоча низьке фінансування напряду відобразиться на оцінках критеріїв.
- Кадрова та організаційна готовність: 0.20 (20%) – людський фактор (підготовка викладачів, підтримка керівництва) є вирішальним для успіху проекту, тож його вага висока. Зацікавлений і навчений персонал може подолати помірні фінансові чи технічні труднощі, але навпаки зробити складно.
- Навчальний контент та інтеграція: 0.20 (20%) – доступність контенту та відповідність програми визначають реальну реалізацію AR у навчанні. Якщо не буде що показувати або AR не впишеться в навчальний план, проект не вдасться, тому ця категорія також отримує значну вагу.

Значення ваг 0.20 для кількох категорій означають їх приблизно рівний вплив. За потреби користувач моделі може змінювати ваги. Наприклад, у технічному вузі можна збільшити вагу технічної готовності, або якщо бюджет строго обмежений – підвищити вагу фінансового критерію. Важливо лише, щоб сума всіх ваг залишалася 1 (100%). В базовій моделі педагогічна ефективність має дещо вищий пріоритет (0.25), а фінансова складова – трохи менш значуща (0.15), виходячи з припущення, що освітня цінність інновації первинна. Однак, якщо за певним проектом фінансування є вирішальним, вагу можна відкоригувати відповідно.

2.3 Розрахунок показника доцільності

Після збору оцінок за всіма питаннями опитувальника розраховується показник F – зведена оцінка доцільності впровадження AR. Обчислення відбувається у кілька кроків:

1. Розрахунок оцінок за категоріями. Для кожної групи і обчислюється середній бал S_i за всіма n_i питаннями цієї категорії:

$$S_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n Q_{ij} - \sum_{j=1}^n p * (3 - Q_{ij}), \quad (2.1)$$

де n – кількість питань в категорії;

Q_{ij} - бал за j -им питанням у категорії S_i ;

p – множник для штрафу за кожен бал менше ніж 3.

Таким чином отримуємо 5 усереднених оцінок – по одній на кожен категорію (вони теж будуть в діапазоні від 1 до 5) та одразу накладаємо штрафи за низькі оцінки.

2. Нормування ваг (якщо ваги задані у відсотках). Переконаємось, що вагові коефіцієнти w_i задані так, щоб сума всіх ваг дорівнювала одиниці. Якщо ваги задані, наприклад, в інших одиницях, їх слід пропорційно нормувати до сумарної одиниці.

3. Базовий розрахунок. Обчислюємо первинний показник F як зважену суму оцінок категорій:

$$F = \sum_{i=1}^5 w_i * S_i, \quad (2.2)$$

Де S_i – обчислена оцінка для обраної категорії;

w_i – вага для даної категорії S_i .

За стандартних ваг, формула розпишеться як:

$$F = 0.25S_1 + 0.20S_2 + 0.15S_3 + 0.20S_4 + 0.20S_5, \quad (2.3)$$

де S_1 – освітня ефективність;

S_2 – технічна готовність;

S_3 – фінансові можливості;

S4 – організаційна готовність;

S5 – контент та інтеграція.

Отриманий показник F також лежатиме в межах від 1 до 5 (як середньозважене значення початкових оцінок). Чим ближче F до 5, тим вища загальна доцільність впровадження AR; наближення до 1 вказує на значні проблеми та невідповідність умов.

4. Урахування логічних обмежень та штрафів. На цьому кроці базовий показник F може бути скоригований, якщо в деяких критичних категоріях оцінки надто низькі. Ідея в тому, що “слабка ланка” може непропорційно знизити загальну доцільність, навіть якщо інші аспекти отримали високі бали. Модель вводить штрафні коригування, щоб відобразити цей ефект:

- Порогові обмеження: Якщо хоча б в одній ключовій категорії оцінка S_i вийшла нижче визначеного порогу (наприклад, < 2 балів), це свідчить про критичну невідповідність. У такому випадку можна запровадити правило, що проект поки не рекомендується до впровадження, доки проблему не буде вирішено, незалежно від високих оцінок за іншими критеріями. Наприклад, оцінка 1 з технічної готовності (брак пристроїв чи підтримки) фактично унеможлиблює реалізацію AR – отже, F слід інтерпретувати як “неприйнятний” навіть якщо педагоги ставлять 5 за користь та фінансову спроможність. Аналогічно, 1 за фінансами означає відсутність коштів, що блокує проект. Таким чином, модель накладає логічне обмеження: мінімально допустимий бал за кожною категорією може бути, наприклад, 3. Якщо якийсь $S_i < 2$, рішення про впровадження негативне, і спершу треба усунути цей недолік, тобто не виконано мінімальну вимогу по категорії X .
- Штрафні коефіцієнти: Окрім жорсткого порогу, можна застосувати м’які штрафи для випадків, коли оцінка трохи нижча за бажану. Наприклад, бажано, щоб усі аспекти були хоча б на середньому рівні (3 бали). Для кожної категорії з S_i , де відповідь на питання Q_{ij} нижче порогового значення 3, можна відняти певну штрафну величину пропорційно

недостачі. Така формула означає, що за кожен бал нижче 3 у якоїсь категорії від загального показника категорії віднімається заданий штраф 0.1. Якщо, наприклад, два питання Q_{ij} отримали по 2 бали (на 1 нижче 3), то сумарний штраф буде 0.2, тобто загальна оцінка категорії зменшиться на 0.2. Якщо ж якась відповідь питання Q_{ij} має 1 бал (на 2 нижче 3), штраф для категорії складе теж 0.2. У випадку, коли більшість критеріїв на високому рівні, а один трохи просідає, штраф буде невеликим, але покаже необхідність підтягнути слабке місце. Значення штрафу можна змінювати – більш високий посилює покарання за дисбаланс між категоріями. Отриманий з урахуванням штрафів показник більш строго враховує однорідність готовності за всіма напрямками. Якщо якась категорія має занижене значення, поєднання з пороговим обмеженням взагалі не дозволить реалізацію без покращення цього показника.

5. Інтерпретація балу. На завершення робиться висновок про доцільність впровадження AR на основі скоригованого F. Можна встановити якісні рівні: наприклад, $F \geq 4$ вказує на високу доцільність (проект майже напевно варто впроваджувати), F в діапазоні $\sim 3-4$ – середня/умовна доцільність (потрібно зважити, можливо доробити окремі аспекти), $F < 3$ – низька доцільність (впровадження недоречно, доки не будуть виправлені слабкі місця). У шкалі 3 бали фактично є нейтральною серединою, тому $F = 3$ означав би, що переваги і недоліки врівноважуються. Значення нижче 3 сигналізують, що проблем більше ніж позитиву. Високі значення наближені до 5 означають, що умови сприятливі і AR доцільно інтегрувати до обраного курсу.

Таким чином, фінальне значення F виступає формалізованою «точкою входу» в алгоритм інтеграції AR: лише проекти з достатнім рівнем доцільності переходять до етапів проектування сценаріїв і розробки прототипів. Це забезпечує раціональне використання ресурсів та фокус на педагогічно виправданих AR-ініціативах.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес і математичну модель індексу доцільності, що дає кількісне обґрунтування рішення про впровадження AR у конкретний курс. Алгоритм охоплює повний життєвий цикл AR-рішення: аналіз потреб і доцільності, формування вимог, розроблення та тестування AR-компонентів, порівняльне моделювання когнітивного навантаження у сценаріях із AR та без неї, а також подальше масштабування. Його ітеративний характер забезпечує повернення до попередніх етапів у разі відсутності покращення сприйняття матеріалу, що запобігає формальному впровадженню AR.

Сформовано індекс доцільності на основі п'яти груп критеріїв (освітня ефективність, технічна, фінансова, організаційна готовність, контент), для яких задано шкалу 1–5 і вагові коефіцієнти. Інтегральний показник F обчислюється як зважена сума категоріальних оцінок із урахуванням порогів і штрафів за «слабкі ланки», що блокує рекомендацію до впровадження за критично низьких значень хоча б за однією ключовою категорією.

Таким чином сформовано відтворюваний алгоритм інтеграції AR та формалізований інструмент оцінювання доцільності, які слугують основою для програмної реалізації та подальшої перевірки впливу AR на сприйняття навчального матеріалу в третьому розділі.

3 РОЗРОБКА ЗАСТОСУНКУ ДОЦІЛЬНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ AR ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Розробка програмного засобу оцінки доцільності впровадження технології AR

У підпункті 2.3 було побудовано логіко-математичну модель оцінки доцільності впровадження технології доповненої реальності у навчальний процес, яка спирається на п'ять узагальнених критеріїв та опитувальник з фіксованою шкалою. Для того щоб ця модель могла реально використовуватися викладачем, недостатньо лише формул – потрібен інструмент, який у зручній формі проведе користувача через усі запитання, автоматично виконає розрахунки і сформує зрозумілий висновок. З цією метою необхідно розробити програмний засіб який реалізовує дану модель та повертає користувачу результати.

Застосунок працює у форматі покрокового майстра (wizard). На першому кроці користувач бачить короткий опис моделі, а також панель налаштувань, де за потреби може відкоригувати вагові коефіцієнти критеріїв та параметр штрафу. Далі викладач послідовно проходить опитувальник, оцінюючи курс за п'ятибальною шкалою. На фінальному екрані програма підсумовує отримані відповіді, обчислює індекс доцільності за формулами, наведеними у розділі 2, і показує детальний текстовий звіт з рекомендацією: чи варто впроваджувати AR для цього курсу, чи доцільніше поки відмовитися або доопрацювати умови.

Постановка вимог до програмного засобу.

Виходячи з моделі, до програмного засобу були сформульовані такі основні вимоги.

Функціональні вимоги. Застосунок має:

- Забезпечити введення експертних оцінок за п'ятьма категоріями (освітня ефективність, технічна готовність, фінансові/ресурсні можливості, кадрова

та організаційна готовність, якість навчального контенту та інтеграції в курс);

- Для кожної категорії послідовно задавати низку запитань опитувальника та приймати відповіді за п'ятибальною шкалою від «категорично ні» до «абсолютно так»;
- Після завершення опитування автоматично підраховувати середній бал по кожній категорії та узагальнений індекс доцільності (з урахуванням ваг критеріїв і штрафів за «слабкі» місця – наприклад, дуже низьку технічну або кадрову готовність);
- Формувати текстовий висновок у зрозумілій людині формі (наприклад: «умови сприятливі, доцільно впроваджувати AR», «доцільність низька, рекомендується доопрацювання технічної інфраструктури» тощо);
- Надавати можливість збереження сформованого звіту в текстовий файл для подальшого використання як додатку до методичних матеріалів чи протоколу засідання кафедри.
- Викладач має мати змогу змінити ваги критеріїв і коефіцієнт штрафу через спеціальну панель налаштувань, не змінюючи вихідний код програми. Це дозволяє адаптувати модель під особливості конкретного закладу освіти.

Нефункціональні вимоги.

- Простий графічний інтерфейс українською мовою з мінімумом елементів управління;
- Відсутність залежності від важких сторонніх бібліотек, що спрощує розгортання на будь-якому ПК з Windows;
- Прозору відповідність реалізації формальній моделі з розділу 2 (всі розрахунки виконуються строго за описаними там правилами);
- Можливість повторного проходження опитувальника для різних курсів без повторного встановлення програми.

Структура та інтерфейс застосунку.

З точки зору користувача застосунок складається з трьох основних екранів, які послідовно відображаються у процесі роботи.

Початковий екран (опис моделі та налаштування).

У верхній частині вікна розміщено короткий текст, де пояснюється, що саме вимірює індекс доцільності, які кроки має виконати викладач і як інтерпретувати результат. Праворуч знаходиться панель «Налаштування моделі», у якій відображаються рекомендовані значення ваг критеріїв і коефіцієнта штрафу. Користувач може прийняти їх за замовчуванням або змінити — наприклад, збільшити вагу освітньої ефективності для профільних дисциплін або посилити штраф за низьку технічну готовність. Після натискання кнопки «Застосувати» нові параметри зберігаються в поточному сеансі, а кнопка «Далі» переводить користувача до опитувальника.

Приклад початкового екрану можна побачити на рисунку 3.1

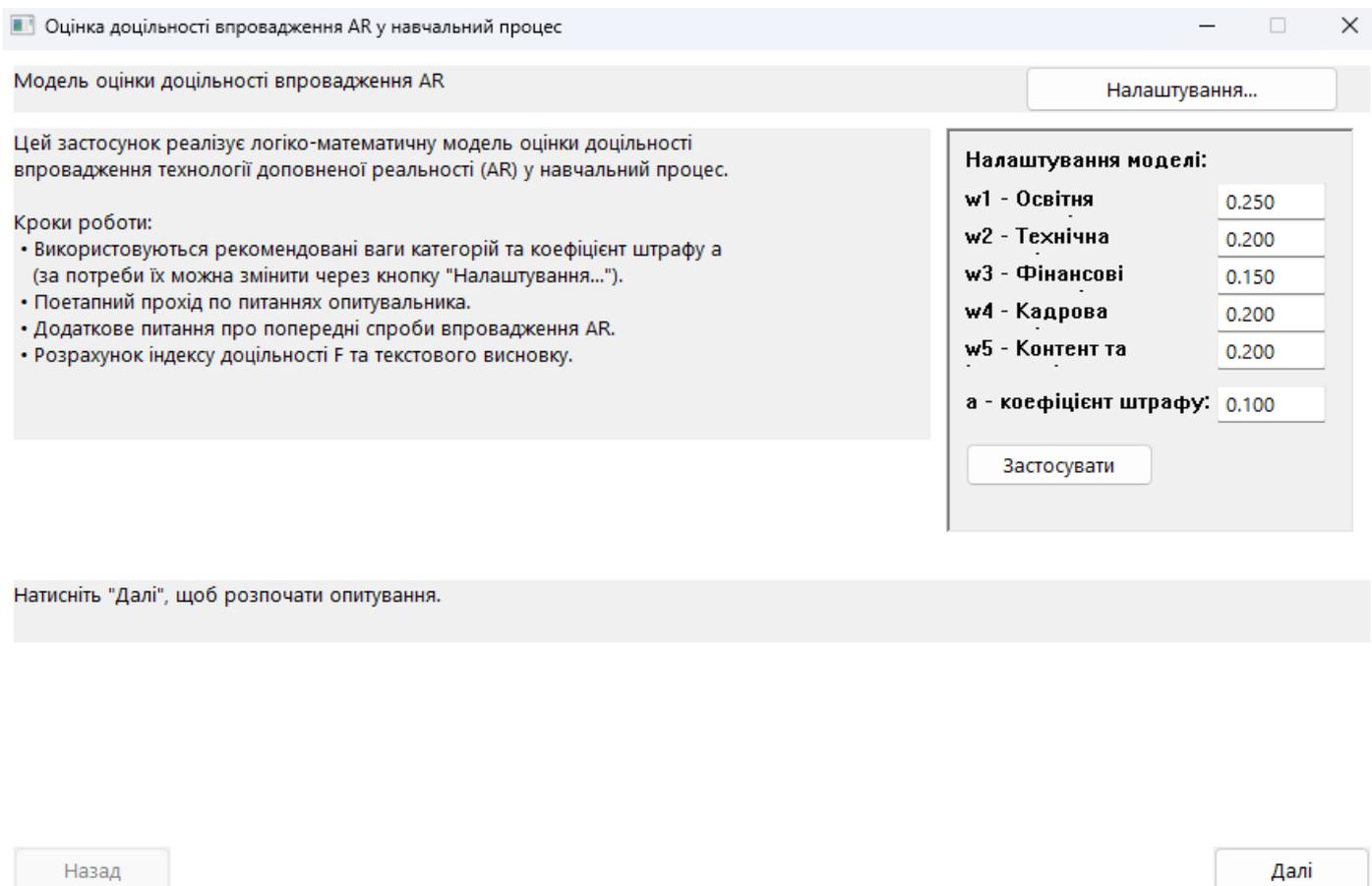


Рис. 3.1 Головне вікно застосунку та панель налаштування моделі.

Екран опитувальника.

На цьому кроці програма по черзі проходить усі категорії. У верхній частині вікна відображається номер категорії та її назва, нижче — текст поточного запитання. Під ним розташовано групу кнопок із п'ятьма варіантами відповіді, що відповідають п'яти рівням згоди. У нижній частині розміщено індикатор прогресу, який показує, яку частину опитувальника вже пройдено. Для переміщення між запитаннями використовуються кнопки «Назад» і «Далі». Таким чином викладач не бачить формул, а просто оцінює курс у звичній для нього форматі анкети.

Оцінка доцільності впровадження AR у навчальний процес

Крок 2. Опитувальник

Категорія 1 з 5:
Освітня ефективність та мотивація

Питання 2 з 2:
AR може гармонійно доповнити методи навчання та посприяти досягненню запланованих результатів?

1. Категорично ні

2. Скоріше ні

3. Можливо

4. Скоріше за все так

5. Абсолютно так

Назад

Далі

Рис 3.2 Вікно проходження опитувальника.

Екран результатів.

Після завершення опитування користувач переходить до фінального кроку. На цьому екрані відображається сформований текстовий звіт: загальний висновок («доцільно / умовно доцільно / не рекомендовано»), значення індексу доцільності, середні оцінки за кожною категорією, застосовані ваги та величина штрафів (якщо вони були). Окремо вказується відповідь на додаткове запитання про попередні спроби впровадження AR. Кнопка «Зберегти звіт» дозволяє експортувати цей текст

у файл, який може бути підшитий до документації курсу або використаний при заповненні підрозділів 2.1 - 2.3 кваліфікаційної роботи.

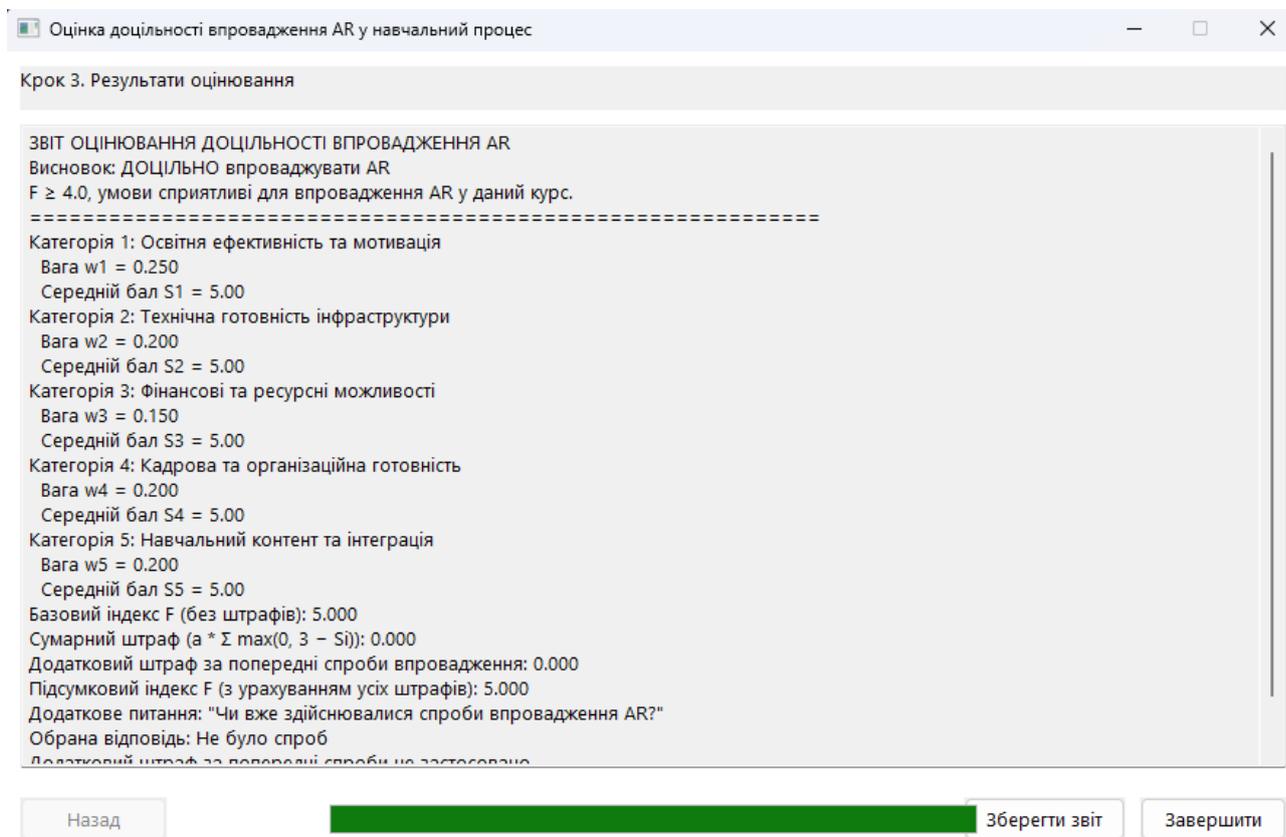


Рис. 3.3 Сторінка з результатами оцінювання та текстовим звітом.

З погляду внутрішньої структури логіка роботи розділена на кілька модулів: модуль налаштувань моделі (зберігає ваги й параметри штрафу), модуль опитувальника (керує послідовністю запитань, накопичує відповіді), модуль обчислення індексу (перетворює відповіді на числові показники та виконує підсумкові розрахунки) і модуль формування звіту. Така декомпозиція полегшує подальшу модифікацію програми, наприклад, додавання нових запитань або зміни структури звіту.

Алгоритм роботи програмного засобу.

Алгоритм роботи застосунку можна описати послідовністю таких дій:

Ініціалізація. Після запуску завантажуються рекомендовані параметри моделі: перелік категорій, тексти запитань та початкові значення ваг. Користувач за бажанням коригує їх на першому екрані й натискає «Далі».

Проходження опитувальника. Програма послідовно виводить усі запитання. Після вибору відповіді кожне значення зберігається у внутрішньому масиві. Валідація введення здійснюється через інтерфейс: натиснути «Далі» можна лише після вибору одного з варіантів.

Агрегація відповідей. Після завершення опитувальника програма для кожної категорії обчислює середній бал. На цьому етапі також перевіряється, чи є категорії з «критично низькою» оцінкою (нижче базового рівня), що впливатиме на підсумкове рішення.

Розрахунок індексу доцільності. Середні значення по категоріях перетворюються на інтегральний показник доцільності. Для цього використовується зважене усереднення з урахуванням ваг критеріїв та спеціальний штрафний доданок, який зменшує індекс у разі сильно проваленої категорії. Детальний вигляд формул подано в підпункті 2.3; у програмі вони реалізовані без змін.

Формування висновку. Залежно від отриманого значення показника програма визначає один із кількох рівнів доцільності. Для кожного рівня прописано окремий текст пояснення, де у вільній формі інтерпретується результат (наприклад, що саме потрібно покращити, якщо індекс виявився нижчим за пороговий).

Відображення й збереження результатів. На екрані результатів користувач бачить сформований звіт і, за потреби, зберігає його у файл. Після завершення роботи викладач може повернутися на перший крок і пройти опитувальник ще раз для іншого курсу або з іншими налаштуваннями моделі.

Розроблений графічний застосунок повністю реалізує формальну модель індексу доцільності, побудовану в другому розділі, але у більш дружньому для викладача вигляді. Він дозволяє без спеціальної математичної підготовки послідовно пройти всі кроки моделі, отримати числовий показник та текстову рекомендацію, що робить його зручним інструментом підтримки прийняття рішень щодо доцільності інтеграції AR у конкретний навчальний курс.

3.2 Аналіз методів оцінювання сприйняття навчального матеріалу

Ефективність запропонованого в роботі алгоритму комплексної інтеграції AR доводиться через підвищення якості сприйняття навчального матеріалу на теоретичних і практичних заняттях. Для цього необхідно мати формалізований спосіб оцінювання того, наскільки «зрозумілим» і «зручним» є навчальний сценарій з AR порівняно з традиційним варіантом. Такий спосіб має, з одного боку, давати кількісні метрики (час, кількість помилок, когнітивну складність), а з іншого – дозволяти пояснити, чому один варіант сценарію виявляється легшим чи складнішим для студента.

У дослідженнях освітніх систем і НСІ зазвичай застосовується кілька груп підходів до оцінювання сприйняття навчальної інформації.

Перша група – суб'єктивні опитування та шкали. Це класичні анкети на основі шкал Лайкерта, опитувальники задоволеності інтерфейсом (SUS, UEQ), авторські опитувальники щодо зрозумілості, мотивації, візуальної привабливості тощо. Такі інструменти добре фіксують емоційне ставлення студентів і їхні власні оцінки «було зрозуміло / складно», однак результати суттєво залежать від настрою, попереднього досвіду й очікувань, а зв'язок із реальними діями при виконанні завдання є опосередкованим. Крім того, суб'єктивні оцінки не завжди зручно використовувати для аналітичного порівняння різних варіантів одного й того ж завдання.

Друга група – поведінкові метрики виконання завдань. До них відносять час виконання, кількість помилок, кількість звернень до підказок, частку студентів, які успішно завершили завдання, тощо. Ці показники безпосередньо пов'язані з навчальним результатом, добре підходять для порівняння варіантів «з AR» та «без AR» і відносно просто збираються в освітньому середовищі. Водночас такі метрики описують наслідок (успішність чи неуспішність діяльності), а не механізм сприйняття: вони не дають відповіді на запитання, які саме кроки виявилися для студента надто складними, де саме AR зняла когнітивні бар'єри, а де залишилася «косметичним» доповненням.

Окрема група – фізіологічні вимірювання (eyetracking, ЕЕГ, пульс, показники напруги тощо). Вони дозволяють безпосередньо оцінювати рівень когнітивного навантаження, виявляти моменти перевантаження уваги, зони «втрати фокусу» на екрані. Однак такі методи потребують дорогого спеціалізованого обладнання, особливих умов проведення експерименту і складної обробки даних, що робить їх малопридатними для типового навчального процесу і для моделі, яку потрібно масштабувати на різні курси.

Нарешті, у сфері НСІ широко застосовуються підходи на основі когнітивних моделей діяльності користувача, зокрема сімейство моделей GOMS (Goals, Operators, Methods, Selection rules). На відміну від опитувальників або «чистих» часових вимірювань, ці моделі описують процес виконання завдання як ієрархію цілей і підцілей, наборів елементарних операторів (фізичних, перцептивних, ментальних) і методів, тобто структурованих послідовностей кроків, які користувач застосовує для досягнення своїх цілей. Правила вибору (selection rules) визначають, який саме метод буде застосовано в конкретному контексті.

На базі базової GOMS-парадигми запропоновано кілька варіантів моделей. CMN-GOMS використовує деревоподібну декомпозицію цілей і методів і добре підходить для структурного аналізу завдань. Модель KLM (Keystroke-Level Model) фокусується на низькорівневих операціях – натискання клавіш, рух миші, паузи на обмірковування – і дозволяє оцінити час виконання уже освоєного сценарію взаємодії. CPM-GOMS враховує можливість паралельного виконання окремих операторів, що важливо для складних експертних дій.

Для задачі цієї дипломної роботи ключовим є варіант NGOMSL (Natural GOMS Language) [22]. NGOMSL вводить формалізовану «мову» опису цілей, підцілей, методів і правил вибору у вигляді напівформальних інструкцій. Кожний метод у NGOMSL записується як послідовність кроків «Якщо ціль X активна, тоді: крок 1..., крок 2..., ...; завершити ціль». Для кожного кроку вказується тип оператора (ментальний, перцептивний, моторний) і використовується набір базових тривалостей, що дозволяє обчислити:

час навчання методу – скільки умовному студентові потрібно, щоб опанувати

послідовність кроків;

час виконання методу – скільки часу займе виконання вже вивченої послідовності операторів.

Таким чином, NGOMSL дає змогу уніфіковано описати і традиційний сценарій виконання навчального завдання (без AR), і сценарій із використанням AR-підказок, контекстних 3D-моделей, підсвічувань елементів інтерфейсу тощо. У варіанті з AR частина кроків може зникати або спрощуватися: наприклад, ментальний оператор «згадати, де в меню знаходиться потрібна команда» замінюється простішим сенсорним оператором «поглянути на підсвічену кнопку в AR-інтерфейсі». Відповідно змінюється і сумарний час виконання, і кількість ментальних операторів, що безпосередньо пов'язано з когнітивним навантаженням та якістю сприйняття інструкції.

Важливо, що GOMS/NGOMSL-підходи не вимагають додаткового лабораторного обладнання: побудова моделі здійснюється на основі аналізу сценарію, інтерфейсу та типових дій студента. Це добре узгоджується з умовами освітнього експерименту, де ключова увага приділяється алгоритму, а не апаратній частині. Водночас результати моделювання мають зрозумілу для викладача інтерпретацію: кількість кроків, типи ментальних операцій, «глибина» дерева цілей тощо дозволяють предметно показати, у яких місцях AR-сценарій спрощує сприйняття матеріалу, а де його вплив мінімальний.

Таблиця 3.1

Порівняння методів оцінювання сприйняття навчального матеріалу

Підхід	Переваги	Недоліки
Опитувальники	Швидко збираються	Залежать від настрою, очікувань. Не показують структуру дій і конкретні «важкі» кроки.

Продовження таблиці 3.1

Порівняння методів оцінювання сприйняття навчального матеріалу

Поведінкові метрики (час, помилки, звернення до підказок)	Об'єктивні показники результату. Легко порівнювати «з AR / без AR».	Показують тільки наслідок (швидше/повільніше, більше/менше помилок). Не пояснюють, чому сценарій складний.
Фізіологічні методи (eyetracking, ЕЕГ, пульс тощо)	Прямий вимір когнітивного навантаження й уваги	Потребують дорогого обладнання. Складні протоколи, важко інтегрувати в звичайний курс.
Класичні GOMS / KLM / CPM-GOMS	Формальний опис цілей, методів, операторів. Можна оцінювати час дій.	<ul style="list-style-type: none"> • Орієнтовані переважно на «експертні» UI-задачі • Менш зручні для моделювання навчання і процесу засвоєння
<u>NGOMSL</u>	Формальна «мова» цілей, методів, операторів. Дозволяє рахувати кількість кроків і модельний час. Видно структуру когнітивних кроків. Зручно порівнювати сценарії на рівні послідовностей дій.	Потрібна детальна формалізація сценаріїв. Дає модельні (аналітичні) оцінки, а не фізіологічні дані.

З огляду на наведені переваги й обмеження, у роботі як основний метод формалізованого оцінювання сприйняття навчального матеріалу обрано NGOMSL, тоді як опитувальники та поведінкові метрики можуть використовуватися як допоміжні засоби валідації результатів.

3.3 Моделювання з NGOMSL

У підрозділі 3.2 було обґрунтовано вибір підходу NGOMSL як основного інструмента формалізації навчальних дій студента. NGOMSL дозволяє описувати цілі, підцілі та методи, задавати послідовність елементарних операторів трьох типів — ментальних (М), перцептивних (Р) та моторних (К) — і на цій основі оцінювати модельний час виконання завдання. У цій роботі NGOMSL використовується саме як формально-аналітична модель: усі кількісні значення є результатом математичного моделювання, а не емпіричних вимірювань.

Базовим об'єктом моделювання обрано навчальне завдання з вищої математики: побудувати та проаналізувати графік рівняння

$$x^2 + y^3 = 3.$$

у середовищі комп'ютерної математики. Таке завдання є достатньо складним для студента першого–другого курсу, оскільки поєднує алгебраїчне перетворення, уявлення про графіки неявно заданих кривих та роботу з інтерфейсом системи побудови графіків. Саме для подібних задач очікується найбільший ефект від використання доповненої реальності.

Для подальшого аналізу розглядаються два варіанти реалізації одного й того самого навчального сценарію.

Перший — традиційний режим (без AR), коли студент працює у класичному середовищі побудови графіків (наприклад, GeoGebra) на комп'ютері або планшеті, самостійно обирає інструменти, вводить рівняння, налаштовує область побудови та інтерпретує отриманий графік.

Другий — режим з AR, коли студент використовує AR-застосунок, спроектований згідно з алгоритмом комплексної інтеграції, розробленим у розділі

2. Застосунок розпізнає формулу $x^2 + y^3 = 3z$ з камери мобільного пристрою, автоматично генерує 3D-графік, накладає його на маркер (аркуш, стіл, площину), відображає координатну систему, підсвічує характерні точки та дозволяє змінювати масштаб і положення моделі жестами, супроводжуючи процес мінімальними контекстними підказками.

Отже, порівнюється не сам математичний зміст, а когнітивні зусилля, необхідні для виконання однакової навчальної задачі у двох сценаріях — традиційному та AR-орієнтованому.

Сприйняття навчального матеріалу істотно залежить від характеристик конкретного студента. На основі аналізу навчальної ситуації виділено п'ять типових профілів:

- «звичайний» студент (середній рівень підготовки та володіння інтерфейсом побудови графіків без AR);
- студент, недосвідчений у побудові графіків;
- студент, досвідчений у побудові графіків;
- студент із порушенням зору;
- студент із розсіяною увагою.

Кожен профіль відрізняється типовою кількістю ментальних, перцептивних та моторних операторів при виконанні тих самих дій, а також коригувальними коефіцієнтами складності (наприклад, додаткові перцептивні оператори для студентів із поганим зором або додаткові ментальні оператори «відновлення контексту» для студентів з розсіяною увагою).

Для математичного моделювання задаються такі припущення. Послідовність дій студента в кожному із двох режимів (без AR та з AR) описується у вигляді ієрархії цілей, підцілей та методів NGOMSL, де кожен крок методу позначається одним оператором типу M, P або K. Для кожного типу оператора задано базові тривалості t_M , t_P та t_K , запозичені з класичних досліджень сімейства GOMS/KLM. Для кожного студентського профілю введено коригувальні коефіцієнти до цих тривалостей та/або до кількості операторів. AR-сценарій моделюється як модифікація традиційного сценарію, у якій частина

кроків спрощується або усувається (автоматична побудова графіка, автоматичне налаштування координатної сітки), а натомість з'являються додаткові, але прості оператори роботи з 3D-моделлю (жести масштабування, обертання, навігація камерою).

На основі NGOMSL-опису для кожної комбінації «режим – профіль студента» обчислюються основні модельні метрики: загальна кількість операторів N_{tot} ; кількість ментальних операторів N_M та їх частка N_M/N_{tot} як індикатор когнітивного навантаження; модельний час виконання завдання T , отриманий як зважена сума тривалостей усіх операторів з урахуванням коригувальних коефіцієнтів профілю. Ці метрики інтерпретуються як аналітична оцінка сприйняття навчального матеріалу в кожному сценарії та для кожної групи студентів і надалі використовуються для кількісного наповнення індексу доцільності, розробленого у розділі 2. Усі значення, наведені в цьому підрозділі, є результатом математичного моделювання, отриманого на основі формалізованої NGOMSL-декомпозиції, а не результатами реальних педагогічних вимірювань.

Декомпозиція навчального завдання в традиційному середовищі без AR

У традиційному варіанті студент виконує завдання у середовищі комп'ютерної математики GeoGebra без будь-яких AR-підказок. У межах NGOMSL верхньорівнева ціль формулюється так:

G0. Побудувати та проаналізувати графік рівняння $x^2 + y^3 = 3z$ у середовищі GeoGebra (без AR).

Для досягнення цієї цілі використовується метод M0, який розбиває завдання на чотири підцілі:

G1 — прочитати та інтерпретувати умову завдання;

G2 — підготувати робоче середовище;

G3 — ввести рівняння та запустити побудову;

G4 — виконати первинний аналіз побудованого графіка.

Отже, метод M0 можна записати так:

«Щоб побудувати графік рівняння $x^2 + y^3 = 3z$, послідовно виконати $G1 \rightarrow G2 \rightarrow G3 \rightarrow G4$ ».

Далі кожна підціль декомпозується до рівня елементарних операторів NGOMSL.

Ціль G1. Прочитати та інтерпретувати умову завдання

Метод M1 «Інтерпретувати умову» включає послідовність операторів:

- P1 — оглянути текст завдання, знайти рівняння $x^2 + y^3 = 3$;
- M1 — перенаправити увагу з загального тексту на формулу;
- M2 — розпізнати структуру виразу (степені x^2 , y^3 , знак «=», права частина 3);
- M3 — зрозуміти тип задачі (не явна функція $y = f(x)$, а неявне рівняння кривої у площині);
- M4 — обрати підхід до побудови (згадати, що GeoGebra дозволяє безпосередньо вводити неявне рівняння у полі введення).

Кількість операторів для G1:

M — 4 (M1–M4); P — 1 (P1); K — 0.

Ціль G2. Підготувати робоче середовище

Метод M2 «Підготувати середовище для побудови» включає:

- P2 — знайти піктограму GeoGebra на робочому столі чи в меню;
- K1, K2 — запустити програму (подвійний клік мишею або дотик);
- P3 — переконатися, що вікно програми відкрилося, інтерфейс завантажився;
- M5 — визначити потрібний режим (2D-графік, стандартна область);
- K3 — перемкнутися на відповідну вкладку або вид («Графік»);
- P4 — оцінити наявність осей та сітки, положення початку координат;
- M6 — прийняти рішення про зміну масштабу/сітки;
- K4, K5 — виконати жест масштабування;
- P5 — перевірити результат масштабування;
- K6 — за потреби виконати ще один жест масштабування або зсув;
- P6 — остаточно оцінити готовність області креслення до роботи.

Узагальнено для G2:

M — 2 (M5, M6); P — 4 (P2–P4, P5–P6); K — 6 (K1–K6).

Ціль G3. Ввести рівняння та запустити побудову

Метод М3 «Ввести рівняння» включає:

- P7 — знайти поле введення;
- K7 — активувати поле введення;
- M7 — згадати правила введення степенів у GeoGebra (символ «^», порядок введення);
- K8–K16 — посимвольне введення формули $x^2 + y^3 = 3$;
- P8 — візуально перевірити правильність введеного виразу;
- M8 — прийняти рішення виконати побудову;
- K17 — активувати побудову (натиснути Enter або кнопку виконання).

Сумарно для G3:

M — 2 (M7, M8); P — 2 (P7, P8); K — 11 (K7–K17).

Ціль G4. Первинний аналіз побудованого графіка

Метод М4 «Проаналізувати графік» включає:

- P9 — перевести погляд у область креслення, знайти побудовану криву;
- P10 — візуально оцінити загальну форму;
- M9 — зіставити побачене з внутрішнім очікуванням, сформованим на етапі G1;
- P11 — перевірити положення перетину з осями;
- M10 — зробити якісний висновок про поведінку кривої (наприклад, що при великих $|y|$ домінує член y^3);
- K18, K19 — за потреби змінити масштаб або пересунути область;
- P12 — зчитати координати характерних точок;
- M11 — прийняти підсумкове рішення щодо коректності побудови (у моделі припускається, що побудова успішна).

Кількість операторів для G4:

M — 3 (M9–M11); P — 4 (P9–P12); K — 2 (K18, K19).

Підсумкові кількості операторів для сценарію без AR

Сумуючи по G1–G4:

$$M: 4 + 2 + 2 + 3 = 11;$$

$$P: 1 + 4 + 2 + 4 = 11;$$

$$K: 0 + 6 + 11 + 2 = 19.$$

Отже, детальна NGOMSL-модель традиційного сценарію містить 41 оператор (11 М, 11 Р, 19 К). Значна частка дій припадає на моторні оператори (введення формули та маніпуляції з інтерфейсом) і на ментальні оператори, пов'язані з пошуком налаштувань та осмисленням умови. Цей сценарій надалі використовується як еталон для порівняння з AR-варіантом.

Декомпозиція навчального завдання з використанням AR

Як і в попередньому підпункті, NGOMSL-опис складається з **цілей, методів та елементарних операторів** трьох типів:

М – ментальні (mental),

Р – перцептивні (perceptual),

К – моторні (motor).

Нумерація операторів у цьому підпункті є **локальною** й використовується лише для опису AR-сценарію.

Верхньорівнева ціль та підцілі

Головна ціль AR-сценарію формулюється так:

G0. Побудувати та проаналізувати графік рівняння $x^2 + y^3 = 3z$ використанням AR-застосунку.

Для її досягнення використовуємо метод M0', який розбиває завдання на три підцілі:

- **G1. Підготувати AR-середовище та активувати сценарій побудови графіка.**
- **G2. Отримати коректний графік рівняння.**
- **G3. Проаналізувати графік та сформулювати відповіді на навчальні запитання.**

Метод M0' можна записати у вигляді:

M0'. Як побудувати графік рівняння $x^2 + y^3 = 3z$ використанням AR-застосунку?

→ послідовно виконати **G1** → **G2** → **G3**.

Далі кожна підціль декомпозується до рівня елементарних операторів типу М, Р, К.

Ціль G1. Підготувати AR-середовище та активувати сценарій

На цьому етапі студент переходить від загального середовища мобільного пристрою до готового AR-режиму, в якому система розпізнає формулу й готується до побудови графіка.

Метод M1. «Підготувати AR-середовище» включає такі оператори:

- P1 – оглянути екран смартфона / планшета, знайти іконку AR-застосунку для побудови графіків;
- M1 – ментально впізнати застосунок як потрібний інструмент («це той додаток, через який ми будуємо графіки в AR»);
- K1 – торкнутися іконки застосунку для запуску;
- P2 – сприйняти завантажений головний екран застосунку (логотип, основні кнопки, меню режимів);
- M2 – обрати режим роботи «AR побудова графіка»;
- K2 – натиснути кнопку/іконку, що відповідає AR-режиму;
- P3 – прочитати коротку інструкцію, що з'являється на екрані («наведіть камеру на записане рівняння»);
- M3 – прийняти рішення виконати вказівку та перейти до наведення камери;
- K3 – піднести пристрій до аркуша з записаним рівнянням $x^2 + y^3 = 3$;
- P4 – оцінити, чи формула повністю потрапляє у видиму область камери, чи немає сильного розмиття або засвітів;
- K4 – за потреби скоригувати положення пристрою (наблизити/віддалити, змінити кут нахилу);
- P5 – сприйняти індикатор успішного розпізнавання формули (наприклад, кольорову рамку навколо виразу або піктограму «✓»);
- M4 – ментально зафіксувати, що формула розпізнана, і перейти до етапу підтвердження побудови.
- Підрахунок операторів для цілі G1:

- ментальні оператори М: М1, М2, М3, М4 → 4;
- перцептивні оператори Р: Р1, Р2, Р3, Р4, Р5 → 5;
- моторні оператори К: К1, К2, К3, К4 → 4.

Таким чином, підготовка AR-середовища містить 13 операторів, причому значну частину становлять перцептивні дії, пов'язані зі зчитуванням інтерфейсу та положенням об'єкта в кадрі.

Ціль G2. Отримати коректний графік рівняння

Після того як формулу розпізнано, студент має переконатися в коректності розпізнаного виразу та ініціювати побудову графіка.

Метод М2. «Підтвердити формулу та запустити побудову» включає:

- Р6 – прочитати розпізнану формулу, що відображається у спеціальному рядку або у верхній частині екрана;
- М5 – порівняти розпізнаний вираз з оригіналом на аркуші, виявити наявність чи відсутність помилок;
- К5 – у разі виявлення помилки активувати режим редагування (натиснути на текст формули або на відповідну кнопку);
- К6 – вилучити помилковий символ (натискання клавіші видалення / відповідної кнопки);
- К7 – ввести правильний символ (цифру, букву або знак дії) засобами екранної клавіатури;
- Р7 – повторно візуально перевірити формулу після редагування;
- М6 – прийняти рішення, що формула тепер відповідає заданому рівнянню $x^2 + y^3 = 3$;
- К8 – натиснути кнопку «Побудувати» (або аналогічну), ініціюючи розрахунок і побудову графіка;
- Р8 – спостерігати появу графіка в AR-сцені (крива накладається на поверхню маркера / стола);
- М7 – оцінити, чи загальний вигляд кривої не суперечить очікуванням; у разі суттєвих розбіжностей (у моделі не розглядаємо) студент повернувся б до редагування.

- Підрахунок операторів для цілі G2:
- ментальні M: M5, M6, M7 → 3;
- перцептивні P: P6, P7, P8 → 3;
- моторні K: K5, K6, K7, K8 → 4.

Отже, етап підтвердження формули й запуску побудови містить 10 операторів, причому кількість моторних кроків істотно менша, ніж у традиційному сценарії без AR, де ручне посимвольне введення формули потребувало довгої послідовності операторів K.

Ціль G3. Проаналізувати графік та сформувати відповіді

На заключному етапі студент працює вже з побудованим AR-графіком: змінює ракурс, виділяє характерні точки, співвідносить побачене з теорією та формує відповіді на навчальні запитання.

Метод M3. «Проаналізувати графік у AR-середовищі» включає:

- P9 – перевести увагу на побудований графік у AR-площині (на екрані видно 3D-криву та координатні осі);
- K9 – виконати жест масштабування (наблизити або віддалити модель для зручного огляду);
- K10 – виконати жест повороту / обертання моделі (змінити ракурс для кращого розуміння форми кривої);
- P10 – сприйняти змінену перспективу, оцінити загальний вигляд кривої (вигини, симетрія, розташування відносно осей);
- P11 – зафіксувати поглядом підсвічені характерні точки (перетини з осями, локальні особливості, підказки застосунку);
- M8 – співвіднести побачене з теоретичними уявленнями про рівняння третього степеня за змінною y (поведінка при великих $|y|$, симетрія тощо);
- P12 – знайти на екрані текстові навчальні запитання або підказки (наприклад, «знайдіть точку перетину з віссю x », «оцініть поведінку графіка при $x \rightarrow \infty$ »);
- M9 – сформулювати відповідь або проміжний висновок (наприклад, приблизні координати точки перетину, опис характеру зростання/спадання);

- K11 – зафіксувати відповідь (усно, у зошиті або шляхом введення у відповідну форму в AR-застосунку);
- M10 – зробити підсумковий ментальний висновок про коректність побудови та завершення задачі, повернутися до загального контексту заняття.
- Підрахунок операторів для цілі G3:
 - ментальні M: M8, M9, M10 → 3;
 - перцептивні P: P9, P10, P11, P12 → 4;
 - моторні K: K9, K10, K11 → 3.

Отже, аналіз графіка в AR-середовищі містить 10 операторів, з помітним зсувом у бік перцептивних дій та зменшенням потреби в повторних масштабуваннях і перебудовах, характерних для плоского статичного зображення.

Узагальнюючи підцілі G1–G3, для базового сценарію з використанням AR-застосунку (для умовного «звичайного» студента) отримуємо:

- ментальні оператори M:
G1: 4 + G2: 3 + G3: 3 = 10;
- перцептивні оператори P:
G1: 5 + G2: 3 + G3: 4 = 12;
- моторні оператори K:
G1: 4 + G2: 4 + G3: 3 = 11.

Сумарно AR-сценарій містить 33 оператори (10 M, 12 P, 11 K). Порівняно з традиційним сценарієм без AR, який у підпункті 3.3.1 містив 41 оператор (11 M, 11 P, 19 K), відбувається:

- помітне скорочення кількості моторних операторів (з 19 до 11) за рахунок відмови від посимвольного введення формули та вручну налаштованої області побудови;
- невелике зменшення ментальних операторів (з 11 до 10), пов'язане зі зняттям частини навантаження з пошуку команд і запам'ятовування синтаксису;
- певне збільшення частки перцептивних операторів (з 11 до 12), що

відображає переорієнтацію діяльності студента на безпосереднє сприйняття графіка і підсвічених елементів у AR-сцені.

Математичне моделювання показників сприйняття навчального матеріалу

Шляхом декомпозиції кроків для умовного «звичайного» студента отримано:

Для традиційного сценарію без AR – 41 оператор (11 М, 11 Р, 19 К);

Для AR-сценарію – 33 оператори (10 М, 12 Р, 11 К).

На основі цієї декомпозиції в цьому підпункті виконується математичне моделювання модельного часу виконання завдання для п'яти профілів студентів, що були описані на початку розділу.

Для умовного «середнього» студента вводяться еталонні тривалості:

$t_M = 0,5\text{с}$ – середній час одного ментального оператора;

$t_P = 0,3\text{с}$ – середній час одного перцептивного оператора;

$t_K = 1,0\text{с}$ – середній час одного моторного оператора.

Ці значення не вимірювались емпірично, а обрані як узгоджені з літературою типового порядку величин для операторів сімейства GOMS/KLM; у подальшому вони служать робочими константами для моделювання [23].

Для «звичайного» студента сумарні кількості операторів у традиційному режимі становлять:

$$N_M^{\text{без AR}} = 11, N_P^{\text{без AR}} = 11, N_K^{\text{без AR}} = 19.$$

Модельний час виконання завдання без AR обчислюємо за формулою:

$$T_{\text{ЗВ}}^{\text{без AR}} = N_M^{\text{без AR}} \cdot t_M + N_P^{\text{без AR}} \cdot t_P + N_K^{\text{без AR}} \cdot t_K. \quad (3.1)$$

Підставляючи значення:

$$T_{\text{ЗВ}}^{\text{без AR}} = 11 \cdot 0,5 + 11 \cdot 0,3 + 19 \cdot 1,0 = 5,5 + 3,3 + 19,0 = 27,8 \text{ с.}$$

Отже, згідно з моделлю, звичайний студент витрачає близько

$T_{\text{ЗВ}}^{\text{без AR}} \approx 27,8\text{с}$ на виконання повної послідовності дій у традиційному середовищі.

Для того самого звичайного студента з використанням AR-застосунку

отримано:

$$N_M^{AR} = 10, N_P^{AR} = 12, N_K^{AR} = 11.$$

Модельний час:

$$T_{ЗВ}^{AR} = N_M^{AR} \cdot t_M + N_P^{AR} \cdot t_P + N_K^{AR} \cdot t_K = 10 \cdot 0,5 + 12 \cdot 0,3 + 11 \cdot 1,0 \\ = 5,0 + 3,6 + 11,0 = 19,6 \text{ с.}$$

Таким чином, для базового профілю:

- без AR: $T_{ЗВ}^{\text{без AR}} \approx 27,8\text{с};$
- з AR: $T_{ЗВ}^{AR} \approx 19,6\text{с}.$

Відносне скорочення часу:

$$p_T(\text{ЗВ}) = \frac{T_{ЗВ}^{\text{без AR}} - T_{ЗВ}^{AR}}{T_{ЗВ}^{\text{без AR}}} \approx \frac{27,8 - 19,6}{27,8} \approx 0,295 (\approx 29,5\%).$$

Це відповідає інтуїтивному висновку: AR-сценарій скорочує модельний час виконання завдання для «звичайного» студента приблизно на третину, головним чином за рахунок зменшення кількості моторних кроків (ручного введення формули та довгих налаштувань середовища).

Масштабування моделі на інші групи студентів

Мета масштабування – отримати модельні оцінки часу виконання завдання для таких профілів студентів:

- «звичайний» студент (базовий рівень підготовки);
- студент, недосвідчений у побудові графіків;
- досвідчений студент (добре володіє системами побудови графіків);
- студент із порушенням зору;
- студент з розсіяною увагою.

Раніше було визначено кількість операторів та час для звичайного студента з AR та без AR.

Ці значення розглядатимемо як еталонні. Вони дозволяють ввести середній час одного оператора для кожного з двох сценаріїв:

$$t_{\text{без AR}} = \frac{T_{\text{ЗВ,без AR}}}{41} \approx 0,68 \text{ с.} \quad (3.2)$$

$$t_{AR} = \frac{T_{зв,AR}}{33} \approx 0,59 \text{ с.} \quad (3.3)$$

Надалі припускається, що для інших профілів студентів усереднений час одного елементарного оператора у межах кожного сценарію (традиційного та AR) наближено такий самий, а відмінності між групами проявляються головним чином у кількості кроків (повторні читання умови, додаткові перевірки тощо).

Нехай загальна кількість операторів для кожної групи визначається через коефіцієнти до базових 41 та 33 операторів.

Вводимо коефіцієнти $\alpha_g^{(без AR)}$ та $\alpha_g^{(AR)}$, які показують, у скільки разів змінюється кількість операторів для профілю g порівняно зі «звичайним» студентом:

- $\alpha_{зв}^{(без AR)} = 1,0, \alpha_{зв}^{(AR)} = 1,0$ – базовий профіль;
- $\alpha_{недосв}^{(без AR)} \approx 1,32$ – недосвідчений у побудові графіків студент виконує приблизно на 30 % більше кроків;
 $\alpha_{недосв}^{(AR)} \approx 1,27$ – AR частково зменшує надлишок дій, але він все одно лишається;
- $\alpha_{досв}^{(без AR)} \approx 0,83, \alpha_{досв}^{(AR)} \approx 0,79$ – досвідчений студент пропускає частину проміжних кроків за рахунок кращого володіння інтерфейсом;
- $\alpha_{зір}^{(без AR)} \approx 1,83$ – студент із порушенням зору виконує майже вдвічі більше кроків (перечитування, масштабування, додаткові огляди сцени);
 $\alpha_{зір}^{(AR)} \approx 1,21$ – AR зменшує, але не усуває повністю додаткові дії;
- $\alpha_{увага}^{(без AR)} \approx 1,46, \alpha_{увага}^{(AR)} \approx 1,94$ – студент з розсіяною увагою часто повертається до попередніх кроків; у AR-сценарії до цього додаються ще й відволікаючі візуальні стимули, тому кількість кроків навіть дещо зростає.

Кількість операторів для кожного профілю отримуємо множенням базових значень на відповідні коефіцієнти з наступним округленням до найближчого цілого:

$$N_g^{(без AR)} = \text{round} (\alpha_g^{(без AR)} \cdot 41),$$

$$N_g^{(AR)} = \text{round} (\alpha_g^{(AR)} \cdot 33). \quad (3.4)$$

Наприклад, для недосвідченого студента без AR:

$$N_{\text{недосв}}^{(\text{без AR})} \approx 1,32 \cdot 41 \approx 54 \text{ оператори,}$$

а для того самого профілю в AR-сценарії:

$$N_{\text{недосв}}^{(AR)} \approx 1,27 \cdot 33 \approx 42 \text{ оператори.}$$

Аналогічним чином обчислюються значення $N_g^{(\text{без AR})}$ та $N_g^{(AR)}$ для інших груп.

Далі використовуючи усереднені тривалості (3.2)–(3.3), модельний час виконання завдання для профілю g у сценарії $r \in \{\text{без AR}, AR\}$ визначається як

$$T_g^{(r)} = N_g^{(r)} \cdot t_r. \quad (3.5)$$

Для «звичайного» студента ця формула дає ті самі значення, що й детальна модель (3.1), а для інших груп – дає узгоджені оцінки, які враховують зміну кількості кроків. Далі підставивши значення та використавши наведені вище формули отримуємо узагальнені результати, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Модельований час виконання завдання для різних профілів студентів

Профіль студента	Кількість операторів в без AR, $N_{\text{без AR}}$	Кількість операторів з AR, N_{AR}	Модельний час без AR, $T_{\text{без AR}}$, с	Модельний час з AR, T_{AR} , с	Відносне скорочення часу, %
Звичайний студент	41	33	27,8	19,6	29,5
Недосвідчений у побудові графіків	54	42	36,6	24,9	31,9
Досвідчений у побудові графіків	34	26	23,1	15,4	33,0
Студент із порушенням зору	75	40	50,9	23,8	53,3
Студент з розсіяною увагою	60	64	40,7	38,0	6,6

На основі даних таблиці 3.2 побудовано графік залежності модельного часу

виконання завдання від профілю студента (див. рис. 3.4).



Рис. 3.4 Графік залежності модельного часу виконання завдання від користувача

3.4 Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено та реалізовано програмний засіб для обчислення індексу доцільності впровадження AR, який у вигляді покрокового майстра дозволяє викладачеві вводити оцінки за критеріями, автоматично отримувати інтегральний показник F та текстову рекомендацію. Модульна структура застосунку (налаштування моделі, опитувальник, блок розрахунку, формування звіту) забезпечує прозорість логіки, можливість подальшої адаптації під інші курси та робить модель із розділу 2 практично придатною.

На основі NGOMSL проведено модельне порівняння сценаріїв без AR та з AR для завдання побудови й аналізу графіка: традиційний варіант вимагає 41 оператора, AR-сценарій – 33, що дає скорочення модельного часу виконання приблизно на третину для «звичайного» студента. Масштабування моделі на п'ять типових профілів показало, що AR-сценарій зменшує час для всіх груп, причому найбільший ефект мають студенти з порушенням зору та недосвідчені в роботі з графіками, а найменший – студенти з розсіяною увагою. Сукупно програмна реалізація індексу доцільності та NGOMSL-моделювання підтверджують, що запропонований алгоритм комплексної інтеграції AR має як формалізований механізм ухвалення рішення «де AR доцільна», так і аналітичні аргументи щодо потенційного покращення сприйняття навчального матеріалу.

ВИСНОВКИ

У цій роботі було послідовно реалізовано задум комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес. Основний акцент зроблено не на окремих AR-ефектах чи демонстраціях, а на побудові цілісної процедури: від аналізу потреб курсу та перевірки доцільності використання AR до проектування, розроблення, тестування AR-сценаріїв і оцінювання їхнього впливу на сприйняття навчального матеріалу. Такий підхід дозволяє перейти від епізодичного використання AR до керованого й відтворюваного впровадження, коли кожне рішення про застосування технології має формальне обґрунтування.

У ході дослідження було показано, що наявні підходи до впровадження AR в освіті зосереджуються переважно на розробленні окремих сценаріїв для конкретних дисциплін і рідко пропонують універсальний механізм попередньої оцінки доцільності. Аналіз літератури та практик ЗВО засвідчив фрагментарність застосування AR, залежність результатів від ентузіазму окремих викладачів та відсутність єдиних критеріїв, за якими можна було б співвіднести педагогічний ефект із технічними, фінансовими й організаційними обмеженнями. Саме ця прогалина стала підставою для розроблення алгоритму, що поєднує педагогічний дизайн, формальну модель прийняття рішення і подальше оцінювання впливу AR на навчальний процес.

Для забезпечення обґрунтованості рішень щодо впровадження AR сформовано математичну модель індексу доцільності F . У ній виділено п'ять груп критеріїв (освітня ефективність і мотивація, технічна готовність, фінансові та ресурсні можливості, організаційна готовність, якість контенту), для яких задано шкалу оцінювання 1–5, вагові коефіцієнти та механізм штрафів за «слабкі ланки». Інтегральний показник F інтерпретується як «точка входу» в алгоритм: до етапів проектування AR-сценаріїв переходять лише ті проекти, що продемонстрували достатній рівень доцільності. Така формалізація дає змогу уникати ситуацій, коли ресурсоємні AR-рішення створюються там, де їхній педагогічний ефект мінімальний.

На основі цієї моделі розроблено програмний засіб, який автоматизує опитування викладача, обчислення індексу доцільності та формування текстового звіту з рекомендацією щодо впровадження AR. Застосунок приховує від користувача математичні розрахунки, пропонуючи послідовний діалог із запитаннями, підрахунок підсумкового балу та зрозуміле трактування результатів («доцільно / умовно доцільно / недоцільно»). Це робить модель практично застосовною в умовах ЗВО й дозволяє вбудувати її в реальні процеси планування курсу.

Для перевірки того, чи справді запропонований алгоритм веде до покращення сприйняття матеріалу, використано формалізоване моделювання навчальних дій за методом NGOMSL. На прикладі завдання з побудови та аналізу графіка рівняння у середовищі комп'ютерної математики змодельовано два сценарії: традиційний (без AR) та сценарій із AR-підказками й тривимірною візуалізацією. Порівняння кількості операторів (ментальних, перцептивних, моторних) і модельного часу виконання показало, що для більшості профілів студентів сценарій з AR зменшує кількість кроків, скорочує час та зміщує акцент із технічних дій на безпосередній аналіз змісту. Це узгоджується з метою роботи – підвищенням ефективності сприйняття навчального матеріалу на теоретичних і практичних заняттях.

Поставлені у вступі завдання виконано повністю. Зокрема:

- 1. Проведено аналіз існуючих способів інтеграції AR в освітні процеси.** Узагальнено технологічні платформи (ARCore, ARKit, WebAR, стаціонарні рішення), типи AR-сценаріїв та приклади використання в STEM, медичній та гуманітарній освіті; виявлено, що переважають локальні проекти без єдиної процедури перевірки доцільності.
- 2. Сформовано математичну модель для визначення доцільності інтеграції AR в освітні процеси.** Запропоновано індекс F із п'ятьма групами критеріїв, ваговими коефіцієнтами та порогами, що дозволяє кількісно оцінити доцільність AR для конкретного курсу і зафіксувати умови, за яких впровадження недоцільне.
- 3. Розроблено алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої**

реальності в навчальний процес. Алгоритм охоплює етапи аналізу доцільності, формування педагогічних і технічних вимог, проєктування AR-сценаріїв, розроблення й тестування прототипів, аналітичного моделювання сценаріїв із AR та без неї, впровадження й подальшого вдосконалення на основі зворотного зв'язку.

4. **Сформовано ролі учасників процесу інтеграції AR у навчальний процес та встановлено їх відповідності.** Описано взаємодію викладача як предметного експерта, розробника AR-рішень та студентів як кінцевих користувачів; показано, як обмін артефактами (вимогами, прототипами, результатами моделювання) між цими ролями забезпечує замкнений цикл підвищення якості AR-компонентів.
5. **Сформовано артефакти алгоритму і визначено їхню функцію.** До таких артефактів віднесено анкету оцінки доцільності, технічне завдання на AR-застосунок, прототипи AR-сцен, звіти про тестування, результати NGOMSL-моделювання, оновлену робочу програму дисципліни та методичні матеріали. Вони пов'язують окремі кроки алгоритму в єдину керовану послідовність і полегшують масштабування рішення на інші курси.
6. **Проведено оцінку та порівняння сприйняття навчального матеріалу з використанням AR та без неї.** На основі NGOMSL-моделювання продемонстровано зменшення кількості операторів і модельного часу виконання завдання для більшості типових профілів студентів, що свідчить про зниження когнітивного навантаження і підтверджує доцільність застосування AR у вибраному навчальному контексті.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що розроблений алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності, формальна модель індексу доцільності та програмний засіб для її реалізації утворюють практичний інструментарій, який дозволяє закладам вищої освіти планувати й оцінювати впровадження AR не інтуїтивно, а на основі прозорих критеріїв і вимірюваних показників сприйняття навчального матеріалу.

Результати дослідження апробовано та опубліковано у тезах доповідей:

1. Черкас Б.В., Задонцев Ю.В. Визначення вимог до розробки застосунку доповненої реальності для навчального процесу. // II Всеукраїнська науково-технічна конференція "Виклики та рішення в програмній інженерії", 26 листопада 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Збірник тез. К.: ДУІКТ, 2025. Подано до друку.

2. Черкас Б.В., Задонцев Ю.В. Аналіз ефективності використання технології доповненої реальності для навчання вищих навчальних закладів. // II Всеукраїнська науково-технічна конференція "Виклики та рішення в програмній інженерії", 26 листопада 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Збірник тез. К.: ДУІКТ, 2025. Подано до друку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Milgram P., Kishino F. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays // IEICE Transactions on Information and Systems. – 1994. – Vol. E77-D, No. 12. – P. 1321–1329.
2. Azuma R. T. A Survey of Augmented Reality // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 1997. – Vol. 6, No. 4. – P. 355–385.
3. Skarbez R., Smith M., Whitton M. C. Revisiting Milgram and Kishino’s Reality–Virtuality Continuum // Frontiers in Virtual Reality. – 2021. – Vol. 2. – Art. 647997.
4. ARCore: Developer Documentation [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://developers.google.com/ar> (дата звернення: 08.12.2025).
5. ARKit: Apple Developer Documentation [Електронний ресурс]. – 2024. – Режим доступу: <https://developer.apple.com/documentation/arkit> (дата звернення: 08.12.2025).
6. Nincarean D., Ali M. B., Dayana N., Halim N. Mobile Augmented Reality: The Potential for Education // Procedia – Social and Behavioral Sciences. – 2013. – Vol. 103. – P. 657–664.
7. Chang H.-Y., Binali T., Liang J.-C. Ten Years of Augmented Reality in Education: A Meta-analysis of (Quasi-) Experimental Studies to Investigate the Impact // Computers & Education. – 2022. – Vol. 191. – Art. 104641.
8. Design of Mobile Augmented Reality in Health Care Education: A Theory-Driven Framework / E. Zhu et al. // JMIR Medical Education. – 2015. – Vol. 1, No. 2. – e10.
9. Bulagang A. F., Baharum A. B. A Framework for Developing Mobile-Augmented Reality in Higher Learning Education // Indian Journal of Science and Technology. – 2017. – Vol. 10, No. 39. – P. 1–8.
10. Karlsson E., Rydmark M. ArQuest: Augmented Reality in Education [Електронний ресурс] // Chalmers Publication Library. – 2015. – Режим доступу: <https://research.chalmers.se/publication/219495>.
11. Eang N., Na-Songkhla J. The Framework of an AR-Quest Instructional Design Model Based on Situated Learning to Enhance Thai Undergraduate Students’ Khmer Vocabulary Ability // LEARN Journal: Language Education and Acquisition Research

Network. – 2020. – Vol. 13, No. 1. – P. 161–177.

12. Augmented Reality in Higher Education: A Systematic Review / G. Li et al. // Education Sciences. – 2025. – Vol. 15, No. 6. – Art. 678.

13. Augmented Reality Teaching Framework: AR Literacy for Visual Communication Design Majors // Selected Papers from the International Visual Literacy Association Conference 2024. – 2024.

14. Гончарова Н. Технологія доповненої реальності в підручниках нового покоління // Проблеми сучасного підручника. – 2019. – Вип. 22. – С. 46–56.

15. Вараксіна Н. Використання технологій змішаної реальності в освіті // Науково-педагогічні студії. – 2024. – № 6. – С. 168–180.

16. Велущак М. Я. Використання доповненої реальності в освітньому процесі закладів вищої освіти України // Академічні візії. – 2025. – Вип. 42.

17. Золотухіна К. І., Баранова Д. І. Технології доповненої реальності. Комп'ютерний практикум : навч. посіб. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 53 с.

18. Гнедіна К. В. Імерсивні технології у вищій освіті: характеристика, потенціал застосування та роль у забезпеченні якості // Сталій розвиток економіки. – 2025. – № 4(55). – С. 491–498.

19. Allen M. W., Sites R. Leaving ADDIE for SAM: An Agile Model for Developing the Best Learning Experiences. – Alexandria, VA : ASTD Press, 2012. – 194 p.

20. Floor N. This Is Learning Experience Design: What It Is, How It Works, and Why It Matters. – New Riders, 2023. – 304 p.

21. An Introduction to Learning Experience Design (LXD) [Електронний ресурс] // UCATT, University of Arizona. – 2022. – Режим доступу: <https://ucatt.arizona.edu> (дата звернення: 08.12.2025).

22. Kieras D. E. A Guide to GOMS Model Usability Evaluation Using NGOMSL // Handbook of Human–Computer Interaction / ed. by M. Helander, T. Landauer, P. Prabhu. – 2nd ed. – Amsterdam : North-Holland, 1997. – P. 733–766.

23. Card S. K., Moran T. P., Newell A. The Psychology of Human-Computer Interaction. – Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates, 1983. – 469 p.

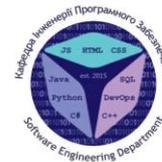
ДОДАТОК А. ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-
КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

КАФЕДРА ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ



Магістерська робота

«Алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в
навчальний процес»

Виконав: студент групи ПДМ-61 Богдан ЧЕРКАС

Керівник: канд. техн. наук, доцент кафедри ІПЗ Юрій ЗАДОНЦЕВ

Київ - 2025

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи: підвищення сприйняття навчального матеріалу під час навчання студентів закладів вищої освіти шляхом застосування алгоритму комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

Об'єкт дослідження: процес інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

Предмет дослідження: алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.

ЗАВДАННЯ РОБОТИ

1. Проаналізувати існуючі способи інтеграції AR в навчальний процес.
2. Розробити алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.
3. Розробити програмний продукт для визначення доцільності використання AR.
4. Оцінити сприйняття навчального матеріалу з використанням та без використання AR.

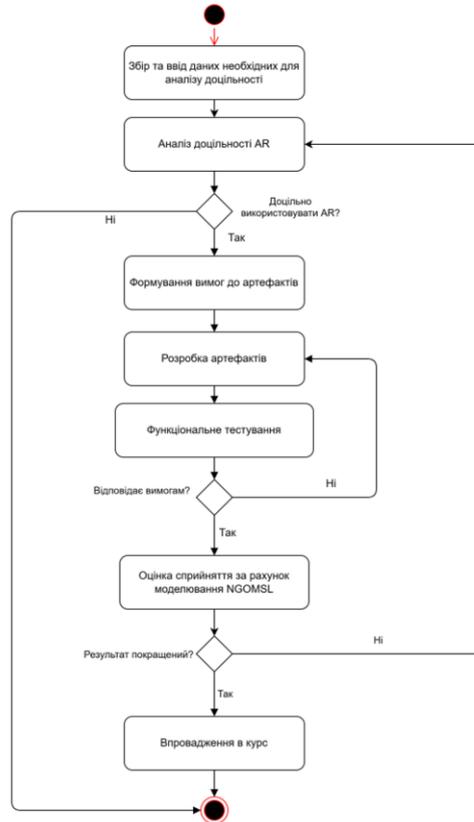
3

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Підхід	Принцип роботи	Ключова прогалина для нашої мети
Mobile Augmented Reality Education	Пояснює, для чого вмикати AR і яку роль вона грає в уроці.	Немає чітких кроків що робити і як вимірювати результат, не визначені ролі учасників.
AR-Quest	Покроковий цикл для AR-квестів (здебільшого вивчення слів/мови).	Вузька сфера, лінійний процес.
Learning Experience Design + Successive Approximation Model	Багато ітерацій прототипу з регулярними покращеннями	Є ітерації, але нема чітких кроків що робити.

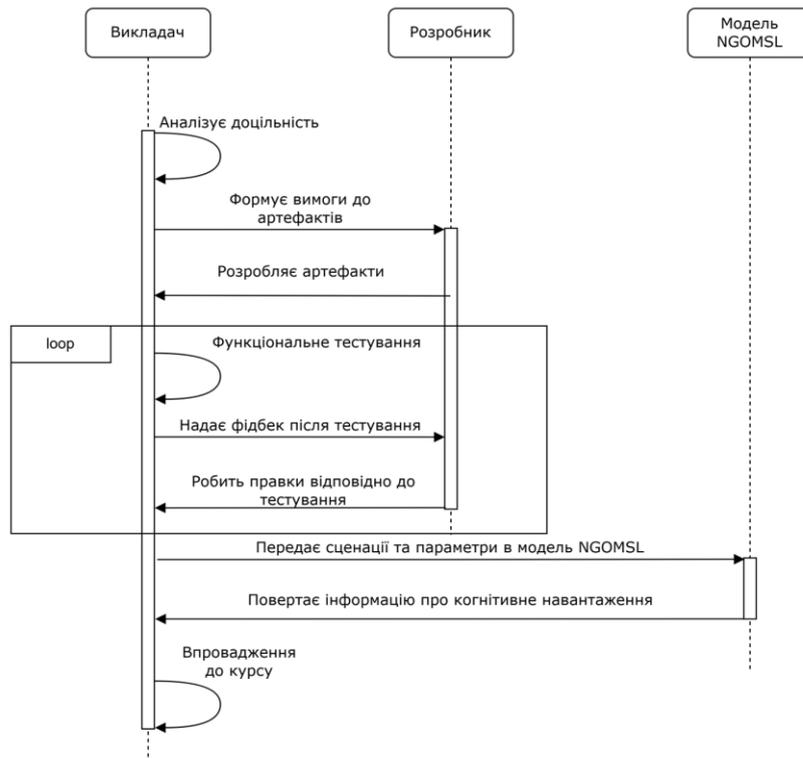
4

АЛГОРИТМ ІНТЕГРАЦІЇ AR В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



5

ДІАГРАМА ПОСЛІДОВНОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ AR В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС



6

ЛОГІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ AR

Опитувальник: 5 груп критеріїв, відповіді на запитання що формують бали.

Група критеріїв, S	Кількість запитань, n
Освітня ефективність	2
Технічна готовність	3
Фінансові та ресурсні можливості	5
Кадрова та організаційна готовність	3
Навчальний контент та інтеграція	3

Оцінка групи критерію: $S_i = \frac{\sum_{j=1}^n Q_j}{n} - \sum_{j=1}^n p * (3 - Q_j)$

де Q - запитання, а p – множник штрафу за оцінку питання нижче порогу 3.

Індекс доцільності: $F = \sum_{i=1}^5 w_i * S_i$, де w_i - ваги груп критеріїв.

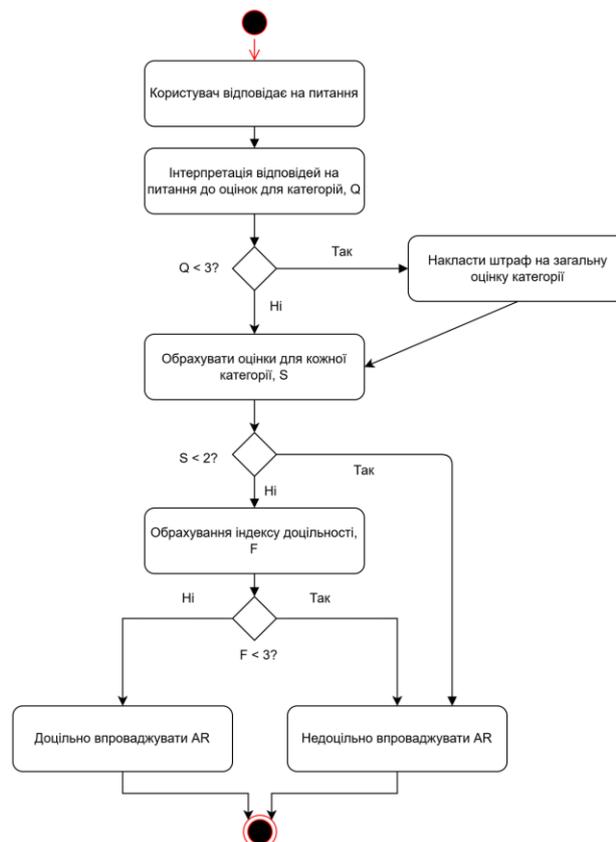
Якщо хоч один $S_i < 2$ - критерій вважається неприйнятним, та $F = 0$.

Рішення:

$\left\{ \begin{array}{l} F < 3, AR \text{ не доцільно впроваджувати} \\ F < 4, AR \text{ доцільно, але є ризики} \\ F \geq 4, AR \text{ доцільно впроваджувати} \end{array} \right.$

7

СХЕМА ОЦІНКИ ДОЦІЛЬНОСТІ AR



8

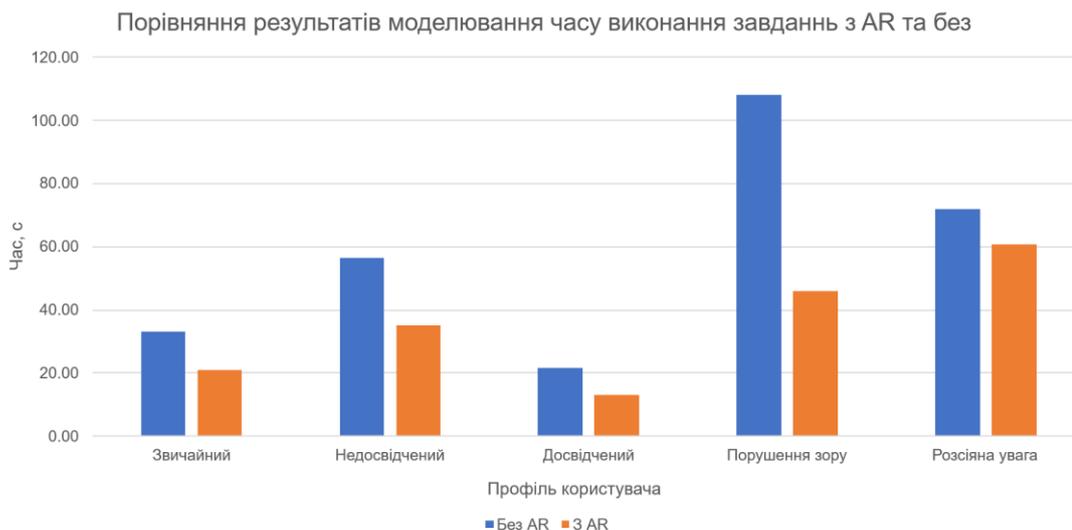
ПОРІВНЯННЯ ІСНУЮЧИХ СПОСОБІВ ОЦІНКИ СПРИЙНЯТТЯ

Підхід	Переваги	Недоліки
Опитувальники	Швидко збираються	<ul style="list-style-type: none"> Залежать від настрою, очікувань Не показують структуру дій і конкретні «важкі» кроки
Поведінкові метрики (час, помилки, звернення до підказок)	<ul style="list-style-type: none"> Об'єктивні показники результату Легко порівнювати «з AR / без AR» 	<ul style="list-style-type: none"> Показують тільки наслідок (швидше/повільніше, більше/менше помилок) Не пояснюють, чому сценарій складний
Фізіологічні методи (eyetracking, ЕЕГ, пульс тощо)	Прямий вимір когнітивного навантаження й уваги	<ul style="list-style-type: none"> Потребують дорогого обладнання Складні протоколи, важко інтегрувати в звичайний курс
Класичні GOMS / KLM / CPM-GOMS	<ul style="list-style-type: none"> Формальний опис цілей, методів, операторів Можна оцінювати час дій 	<ul style="list-style-type: none"> Орієнтовані переважно на «експертні» UI-задачі Менш зручні для моделювання навчання і процесу засвоєння
NGOMSL	<ul style="list-style-type: none"> Дозволяє рахувати кількість кроків і модельний час Зручно порівнювати сценарії «з AR» та «без AR» на рівні послідовностей дій 	<ul style="list-style-type: none"> Потрібна детальна формалізація сценаріїв Дає модельні (аналітичні) оцінки, а не фізіологічні дані

МОДЕЛЮВАННЯ ЧАСУ СПРИЙНЯТТЯ ЗАСВОЄНОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ДОПОМОГОЮ NGOMSL

Завдання: побудувати графік $x^2 + y^3 = 3$.

NGOMSL: моделювання часу виконання кроків сценарію та ймовірної кількості помилок.



ЕКРАННІ ФОРМИ

Оцінка доцільності впровадження AR у навчальний процес
— □ ×

Модель оцінки доцільності впровадження AR
Налаштування...

Цей застосунок реалізує логіко-математичну модель оцінки доцільності впровадження технології доповненої реальності (AR) у навчальний процес.

Кроки роботи:

- Використовуються рекомендовані ваги категорій та коефіцієнт штрафу a (за потреби їх можна змінити через кнопку "Налаштування...").
- Поетапний прохід по питаннях опитувальника.
- Додаткове питання про попередні спроби впровадження AR.
- Розрахунок індексу доцільності F та текстового висновку.

Налаштування моделі:

w1 - Освітня	0.250
w2 - Технічна	0.200
w3 - Фінансові	0.150
w4 - Кадрова	0.200
w5 - Контент та	0.200
a - коефіцієнт штрафу:	0.100

Застосувати

Натисніть "Далі", щоб розпочати опитування.

Назад
Далі

11

ЕКРАННІ ФОРМИ

Модель оцінки доцільності впровадження AR
Налаштування...

Цей застосунок реалізує логіко-математичну модель оцінки доцільності впровадження технології доповненої реальності (AR) у навчальний процес.

Кроки роботи:

- Використовуються рекомендовані ваги категорій та коефіцієнт штрафу a (за потреби їх можна змінити через кнопку "Налаштування...").
- Поетапний прохід по питаннях опитувальника.
- Додаткове питання про попередні спроби впровадження AR.
- Розрахунок індексу доцільності F та текстового висновку.

Натисніть "Далі", щоб розпочати опитування.

Назад
Далі

12

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих способів інтеграції AR в навчальний процес. Результатом є обґрунтування необхідності створення алгоритму комплексної інтеграції AR, який усуває виявлені обмеження існуючих підходів та реалізує формалізовану перевірку доцільності, чіткий поділ ролей учасників та послідовність етапів впровадження.
2. Розроблено алгоритм комплексної інтеграції технології доповненої реальності в навчальний процес.
3. Сформовано математичну модель для визначення доцільності інтеграції AR в навчальний процес.
4. Розроблено застосунок для визначення доцільності використання AR.
5. Проведено оцінку та порівняння сприйняття навчального матеріалу з використанням та без використання AR. Моделювання з NGOMSL показало покращення часового результату побудування графіку з AR на 12 секунд.

13

ПУБЛІКАЦІЇ ТА АПРОБАЦІЯ РОБОТИ

Тези доповідей:

1. Черкас Б.В., Задонцев Ю.В. Визначення вимог до розробки застосунку доповненої реальності для навчального процесу. // II Всеукраїнська науково-технічна конференція "Виклики та рішення в програмній інженерії", 26 листопада 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Збірник тез. К.: ДУІКТ, 2025. **Подано до друку.**
2. Черкас Б.В., Задонцев Ю.В. Аналіз ефективності використання технології доповненої реальності для навчання вищих навчальних закладів. // II Всеукраїнська науково-технічна конференція "Виклики та рішення в програмній інженерії", 26 листопада 2025 р., Київ, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Збірник тез. К.: ДУІКТ, 2025. **Подано до друку.**

14

ДОДАТОК Б. ЛИСТИНГ ОСНОВНИХ МОДУЛІВ

```

1. App2.cpp
#include <windows.h>
#include <commctrl.h>
#include <commdlg.h>
#include <vector>
#include <string>
#include <sstream>
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include <fstream>

#pragma comment(lib, "Comctl32.lib")
#pragma comment(lib, "Comdlg32.lib")

#pragma comment(linker,
"\\manifestdependency:type='win32' \
name='Microsoft.Windows.Common-Controls'
version='6.0.0.0' \
processorArchitecture='*'
publicKeyToken='6595b64144ccf1df' language='*\\'")

struct Question {
    std::wstring text;
    int score;
};

struct Category {
    std::wstring name;
    double defaultWeight;
    double weight;
    double averageScore;
    std::vector<Question> questions;
};

std::vector<Category> g_categories;

double g_penaltyCoefficient = 0.1;
double g_Fbase = 0.0;
double g_Fadjusted = 0.0;
double g_penalty = 0.0;
double g_prevAttemptPenalty = 0.0;
bool g_hasCritical = false;
std::wstring g_conclusion;
std::wstring g_explanation;
std::wstring g_reportText;

int g_totalQuestions = 0;
int g_answeredQuestions = 0;

int g_prevAttemptScore = 0;
bool g_prevAttemptAsked = false;

enum class AppStep {
    Intro,
    Questions,
    Results
};

AppStep g_step = AppStep::Intro;
size_t g_currentCategory = 0;
size_t g_currentQuestion = 0;

HWND g_hMainWnd = nullptr;
HWND g_hTitle = nullptr;
HWND g_hText = nullptr;
HWND g_hHint = nullptr;
HWND g_hBtnBack = nullptr;
HWND g_hBtnNext = nullptr;
HWND g_hBtnSave = nullptr;
HWND g_hResultEdit = nullptr;
HWND g_hProgress = nullptr;

HWND g_hRadioButtons[5] = { nullptr, nullptr,
nullptr, nullptr, nullptr };

HWND g_hBtnSettings = nullptr;
HWND g_hSettingsPanel = nullptr;
HWND g_hWeightEdits[5] = { nullptr, nullptr,
nullptr, nullptr };
HWND g_hPenaltyEdit = nullptr;
HWND g_hBtnApplySettings = nullptr;

HFONT g_hFont = nullptr;

const double WEIGHT_SUM_TOLERANCE =
0.001;

const wchar_t* ANSWER_OPTIONS[5] = {
    L"1. Категорично ні",
    L"2. Скоріше ні",
    L"3. Можливо",
    L"4. Скоріше за все так",
    L"5. Абсолютно так"
};

const wchar_t* ADDITIONAL_TRY_OPTIONS[4] =
{
    L"Не було спроб",
    L"Одна",
    L"Дві",
    L"Три та більше"
};

std::wstring GetEditText(HWND hEdit) {
    int len = GetWindowTextLengthW(hEdit);
    if (len <= 0) return L"";
    std::wstring s;
    s.resize(len + 1);
    GetWindowTextW(hEdit, &s[0], len + 1);
    s.resize(len);
    return s;
}

bool TryParseDouble(const std::wstring& s, double&
out) {
    if (s.empty()) return false;
    double val = 0.0;
    if (swscanf_s(s.c_str(), L"%lf", &val) == 1) {
        out = val;
        return true;
    }
    return false;
}

```

```

bool TryParseInt(const std::wstring& s, int& out) {
    if (s.empty()) return false;
    int val = 0;
    if (swscanf_s(s.c_str(), L"%d", &val) == 1) {
        out = val;
        return true;
    }
    return false;
}

void InitModel() {
    g_categories.clear();

    g_categories = {
        {
            L"Освітня ефективність та мотивація",
            0.25,
            0.25,
            0.0,
            {
                { L"AR може покращити сприйняття складних понять і матеріалу у даному навчальному курсі?", 0 },
                { L"AR може гармонійно доповнити методи навчання та посприяти досягненню запланованих результатів?", 0 }
            }
        },
        {
            L"Технічна готовність інфраструктури",
            0.20,
            0.20,
            0.0,
            {
                { L"У розпорядженні навчального закладу або студентів є достатня кількість пристроїв, сумісних з AR?", 0 },
                { L"Наявна необхідна інфраструктура (інтернет, бездротове з'єднання тощо)?", 0 },
                { L"Наявні пристрої сумісні з актуальними технологіями та ПЗ AR (камери, QR, LIDAR тощо)?", 0 },
                { L"Є доступ до кваліфікованої технічної підтримки впровадження AR?", 0 }
            }
        },
        {
            L"Фінансові та ресурсні можливості",
            0.15,
            0.15,
            0.0,
            {
                { L"Бюджет дозволяє придбати / залучити необхідні пристрої та обладнання для AR?", 0 },
                { L"Бюджет дозволяє придбати / залучити відсутні, але необхідні пристрої для AR?", 0 },
                { L"Бюджет дозволяє придбати необхідне програмне забезпечення для AR?", 0 },
                { L"Часові рамки курсу дозволяють розробити AR-контент?", 0 },
                { L"Очікувана вартість впровадження AR виправдана підвищенням ефективності навчання?", 0 }
            }
        },
        {
            L"Кадрова та організаційна готовність",
            0.20,
            0.20,
            0.0,
            {

```

```

            { L"Викладачі мають досвід або готовність працювати з AR у навчальному процесі?", 0 },
            { L"Викладачі зацікавлені у впровадженні AR?", 0 },
            { L"Студенти зацікавлені у використанні AR у навчальному процесі?", 0 }
        }
    },
    {
        L"Навчальний контент та інтеграція",
        0.20,
        0.20,
        0.0,
        {
            { L"Існують готові AR-застосунки / матеріали, які можна інтегрувати у курс?", 0 },
            { L"Є можливість створювати власний AR-контент у разі відсутності готових рішень?", 0 },
            { L"У межах заняття є достатньо часу для використання AR без шкоди іншим видам діяльності?", 0 }
        }
    }
};

g_totalQuestions = 0;
for (auto& c : g_categories) {
    g_totalQuestions +=
static_cast<int>(c.questions.size());
}
g_totalQuestions += 1;

g_penaltyCoefficient = 0.1;
g_Fbase = g_Fadjusted = g_penalty = 0.0;
g_prevAttemptPenalty = 0.0;
g_hasCritical = false;
g_conclusion.clear();
g_explanation.clear();
g_reportText.clear();
g_answeredQuestions = 0;
g_currentCategory = 0;
g_currentQuestion = 0;
g_step = AppStep::Intro;

g_prevAttemptScore = 0;
g_prevAttemptAsked = false;
}

void ComputeResults() {
    g_Fbase = 0.0;
    g_penalty = 0.0;
    g_prevAttemptPenalty = 0.0;
    g_hasCritical = false;

    for (auto& cat : g_categories) {
        g_Fbase += cat.weight * cat.averageScore;
        if (cat.averageScore < 3.0) {
            g_penalty += (3.0 - cat.averageScore);
            g_hasCritical = true;
        }
    }

    g_penalty *= g_penaltyCoefficient;

    if (g_prevAttemptAsked)
    {
        g_prevAttemptPenalty = g_prevAttemptScore;
    }
    else
    {
        g_prevAttemptPenalty = 0.0;
    }
}

```

```

    }

    g_Fadjusted = g_Fbase - g_penalty -
g_prevAttemptPenalty;
    if (g_Fadjusted < 0.0) g_Fadjusted = 0.0;
    if (g_Fadjusted > 5.0) g_Fadjusted = 5.0;

    if (g_hasCritical) {
        g_conclusion = L"НЕ ДОЦІЛЬНО
впроваджувати AR";
        g_explanation = L"Принаймні одна категорія
має середній бал нижче 3. "
        L"Це вважається неприйнятним
мінімальним рівнем.";
    }
    else {
        if (g_Fadjusted < 2.0) {
            g_conclusion = L"НЕ ДОЦІЛЬНО
впроваджувати AR";
            g_explanation = L"Підсумковий індекс F <
3.0, умови недостатні для ефективного впровадження.";
        }
        else if (g_Fadjusted < 4.0) {
            g_conclusion = L"УМОВНО ДОЦІЛЬНО
впроваджувати AR";
            g_explanation = L"F знаходиться в межах
3.0–4.0: впровадження можливе за умови "
            L"додаткової підготовки та усунення
слабких місць.";
        }
        else {
            g_conclusion = L"ДОЦІЛЬНО
впроваджувати AR";
            g_explanation = L"F ≥ 4.0, умови
сприятливі для впровадження AR у даний
курс.";
        }
    }

    std::wstringstream ss;
    ss << L"ЗВІТ ОЦІНЮВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ
ВПРОВАДЖЕННЯ AR\r\n";

    ss << L"Висновок: " << g_conclusion << L"\r\n";
    ss << g_explanation << L"\r\n";

    ss << L"=====\r\n\r\n";

    for (size_t i = 0; i < g_categories.size(); ++i) {
        const auto& cat = g_categories[i];
        ss << L"Категорія " << (i + 1) << L": " <<
cat.name << L"\r\n";
        ss << L" Вага w" << (i + 1) << L" = " <<
std::fixed << std::setprecision(3) << cat.weight << L"\r\n";
        ss << L" Середній бал S" << (i + 1) << L" = "
<< std::fixed << std::setprecision(2) << cat.averageScore <<
L"\r\n\r\n";
    }

    ss << L"Базовий індекс F (без штрафів): " <<
std::fixed << std::setprecision(3) << g_Fbase << L"\r\n";
    ss << L"Сумарний штраф (a * Σ max(0,
3 - Si)): " << std::fixed << std::setprecision(3)
<< g_penalty << L"\r\n";
    ss << L"Додатковий штраф за попередні спроби
впровадження: " << std::fixed << std::setprecision(3) <<

```

```

g_prevAttemptPenalty << L"\r\n";
    ss << L"Підсумковий індекс F (з урахуванням
усіх штрафів): " << std::fixed << std::setprecision(3) <<
g_Fadjusted << L"\r\n\r\n";

    if (g_prevAttemptAsked) {
        ss << L"Додаткове питання: \"Чи вже
здійснювалися спроби впровадження AR?\r\n";
        ss << L"Обрана відповідь: " <<
ADDITIONAL_TRY_OPTIONS[static_cast<int>(g_prevAtte
mptScore)] << L"\r\n";
        if (g_prevAttemptPenalty > 0.0) {
            ss << L"Через позитивну відповідь
підсумковий індекс зменшено на 1 бал.\r\n";
        }
        else {
            ss << L"Додатковий штраф за попередні
спроби не застосовано.\r\n";
        }
    }

    g_reportText = ss.str();
}

void SaveReportToFile(HWND hWndOwner) {
    if (g_reportText.empty()) {
        MessageBoxW(hWndOwner, L"Немає даних
для збереження.", L"Помилка", MB_OK |
MB_ICONERROR);
        return;
    }

    wchar_t szFileName[MAX_PATH] =
L"AR_Evaluation_Report.txt";

    OPENFILENAMEW ofn = { 0 };
    ofn.lStructSize = sizeof(ofn);
    ofn.hwndOwner = hWndOwner;
    ofn.lpstrFilter = L"Text Files (*.txt)\0*.*\0All
Files (*.*)\0*.*\0";
    ofn.lpstrFile = szFileName;
    ofn.nMaxFile = MAX_PATH;
    ofn.Flags = OFN_OVERWRITEPROMPT;
    ofn.lpstrDefExt = L"txt";

    if (GetSaveFileNameW(&ofn)) {
        std::wofstream file(ofn.lpstrFile);
        if (!file) {
            MessageBoxW(hWndOwner, L"Не вдалося
відкрити файл для запису.", L"Помилка", MB_OK |
MB_ICONERROR);
            return;
        }
        file << g_reportText;
        file.close();
        MessageBoxW(hWndOwner, L"Звіт збережено
успішно.", L"Готово", MB_OK |
MB_ICONINFORMATION);
    }
}

void DrawRadarChart(HDC hdc, const RECT& rc) {
    if (g_categories.empty()) return;

    int n = static_cast<int>(g_categories.size());

    int width = rc.right - rc.left;
    int height = rc.bottom - rc.top;

    int cx = rc.left + (width * 3) / 4;

```

```

int cy = rc.top + height / 2;
int radius = min(width / 4, height / 3);

HPEN hOldPen = (HPEN)SelectObject(hdc,
GetStockObject(DC_PEN));
HBRUSH hOldBrush =
(HBRUSH)SelectObject(hdc,
GetStockObject(NULL_BRUSH));
SetDCPenColor(hdc, RGB(200, 200, 200));
Ellipse(hdc, cx - radius, cy - radius, cx + radius, cy
+ radius);

for (int i = 0; i < n; ++i) {
double angle = (2.0 * 3.1415926535 * i) / n -
3.1415926535 / 2.0;
int x = cx + static_cast<int>(cos(angle) * radius);
int y = cy + static_cast<int>(sin(angle) * radius);
MoveToEx(hdc, cx, cy, nullptr);
LineTo(hdc, x, y);

std::wstring label = L"S" + std::to_wstring(i + 1);
TextOutW(hdc, x - 10, y - 10, label.c_str(),
(int)label.size());
}

std::vector<POINT> points(n);
for (int i = 0; i < n; ++i) {
double angle = (2.0 * 3.1415926535 * i) / n -
3.1415926535 / 2.0;
double norm = g_categories[i].averageScore /
5.0;
int x = cx + static_cast<int>(cos(angle) * radius
* norm);
int y = cy + static_cast<int>(sin(angle) * radius *
norm);
points[i].x = x;
points[i].y = y;
}

SetDCPenColor(hdc, RGB(0, 0, 255));
SetDCBrushColor(hdc, RGB(180, 180, 255));
SelectObject(hdc, GetStockObject(DC_BRUSH));
Polygon(hdc, points.data(), n);

SelectObject(hdc, hOldPen);
SelectObject(hdc, hOldBrush);
}

void UpdateSettingsPanelControls() {
if (!g_hSettingsPanel) return;

wchar_t buf[32];

for (size_t i = 0; i < g_categories.size() && i < 5;
++i) {
if (!g_hWeightEdits[i]) continue;
swprintf_s(buf, 32, L"%0.3f",
g_categories[i].weight);
SetWindowTextW(g_hWeightEdits[i], buf);
}

if (g_hPenaltyEdit) {
swprintf_s(buf, 32, L"%0.3f",
g_penaltyCoefficient);
SetWindowTextW(g_hPenaltyEdit, buf);
}
}

void ApplySettings(HWND hWnd) {
double weights[5];

```

```

double sumW = 0.0;

for (int i = 0; i < 5; ++i) {
if (!g_hWeightEdits[i]) return;
std::wstring txt =
GetEditText(g_hWeightEdits[i]);
double w = 0.0;
if (!TryParseDouble(txt, w) || w < 0.0 || w > 1.0)
{
MessageBoxW(hWnd, L"Введіть коректні
ваги у діапазоні [0.0; 1.0].",
L"Помилка вводу", MB_OK |
MB_ICONWARNING);
return;
}
weights[i] = w;
sumW += w;
}

if (std::fabs(sumW - 1.0) >
WEIGHT_SUM_TOLERANCE) {
wchar_t buf[128];
swprintf_s(buf, 128, L"Сума ваг = %0.4f. Вона
має бути близька до 1.0 (±%0.3f)",
sumW, WEIGHT_SUM_TOLERANCE);
MessageBoxW(hWnd, buf, L"Некоректна сума
ваг", MB_OK | MB_ICONWARNING);
return;
}

if (!g_hPenaltyEdit) return;
std::wstring ptxt = GetEditText(g_hPenaltyEdit);
double a = 0.0;
if (!TryParseDouble(ptxt, a) || a < 0.0 || a > 1.0) {
MessageBoxW(hWnd, L"Введіть коректне
значення коефіцієнта а у діапазоні [0.0; 1.0].",
L"Помилка вводу", MB_OK |
MB_ICONWARNING);
return;
}

for (size_t i = 0; i < g_categories.size() && i < 5;
++i) {
g_categories[i].weight = weights[i];
}
g_penaltyCoefficient = a;

MessageBoxW(hWnd, L"Налаштування успішно
застосовано.", L"Налаштування", MB_OK |
MB_ICONINFORMATION);
}

void UpdateUI() {
if (g_hHint)
ShowWindow(g_hHint, SW_HIDE);

ShowWindow(g_hBtnSave, SW_HIDE);
ShowWindow(g_hResultEdit, SW_HIDE);

for (int i = 0; i < 5; ++i) {
if (g_hRadioButtons[i]) {
ShowWindow(g_hRadioButtons[i],
SW_HIDE);
SendMessageW(g_hRadioButtons[i],
BM_SETCHECK, BST_UNCHECKED, 0);
}
}
}

if (g_step == AppStep::Results) {
ShowWindow(g_hSettingsPanel, SW_HIDE);

```

```

    }

    switch (g_step) {
    case AppStep::Intro:
    {
        SetWindowTextW(g_hTitle, L"Модель оцінки
доцільності впровадження AR");

        std::wstring intro =
            L"Цей застосунок реалізує логіко-
математичну модель оцінки доцільності\n"
            L"впровадження технології доповненої
реальності (AR) у навчальний процес.\n\n"
            L"Кроки роботи:\n"
            L" • Використовуються рекомендовані ваги
категорій та коефіцієнт штрафу a\n"
            L" (за потреби їх можна змінити через
кнопку "Налаштування...\").\n"
            L" • Поетапний прохід по питаннях
опитувальника.\n"
            L" • Додаткове питання про попередні
спроби впровадження AR.\n"
            L" • Розрахунок індексу доцільності F та
текстового висновку.\n";
        SetWindowTextW(g_hText, intro.c_str());

        SetWindowTextW(g_hHint, L"Натисніть
\"Далі\", щоб розпочати опитування.");
        ShowWindow(g_hHint, SW_SHOW);
        EnableWindow(g_hBtnBack, FALSE);
        SetWindowTextW(g_hBtnNext, L"Далі");

        ShowWindow(g_hText, SW_SHOW);
        ShowWindow(g_hProgress, SW_HIDE);
        break;
    }
    case AppStep::Questions:
    {
        SetWindowTextW(g_hTitle, L"Крок 2.
Опитувальник");

        std::wstringstream ss;

        if (g_currentCategory < g_categories.size()) {
            const auto& cat =
g_categories[g_currentCategory];
            const auto& q =
cat.questions[g_currentQuestion];

            ss << L"Категорія " << (g_currentCategory +
1) << L" з " << g_categories.size() << L":\n";
            ss << cat.name << L"\n\n";
            ss << L"Питання " << (g_currentQuestion +
1) << L" з " << cat.questions.size() << L":\n";
            ss << q.text << L"\n";
            SetWindowTextW(g_hText, ss.str().c_str());

            for (int i = 0; i < 5; ++i) {
                if (g_hRadioButtons[i]) {
                    ShowWindow(g_hRadioButtons[i],
SW_SHOW);
                    SendMessageW(g_hRadioButtons[i],
BM_SETCHECK, BST_UNCHECKED, 0);
                }
            }
        }
        else
        {
            ss << L"Додаткове питання:\n\n";
            ss << L"Скільки було невдалих спроб

```

```

впровадження AR для цього курсу?\n\n";
            SetWindowTextW(g_hText, ss.str().c_str());

            for (int i = 0; i < 4; ++i) {
                if (g_hRadioButtons[i]) {
                    SetWindowTextW(g_hRadioButtons[i],
ADDITIONAL_TRY_OPTIONS[i]);
                }
            }

            for (int i = 0; i < 4; ++i) {
                if (g_hRadioButtons[i]) {
                    ShowWindow(g_hRadioButtons[i],
SW_SHOW);
                    SendMessageW(g_hRadioButtons[i],
BM_SETCHECK, BST_UNCHECKED, 0);
                }
            }

            ShowWindow(g_hProgress, SW_SHOW);
            SendMessageW(g_hProgress,
PBM_SETRANGE, 0, MAKELPARAM(0, g_totalQuestions));
            SendMessageW(g_hProgress, PBM_SETPOS,
g_answeredQuestions, 0);

            SetWindowTextW(g_hBtnNext, L"Далі");
            EnableWindow(g_hBtnBack, FALSE);
            break;
        }
    case AppStep::Results:
    {
        SetWindowTextW(g_hTitle, L"Крок 3.
Результати оцінювання");

        ShowWindow(g_hText, SW_HIDE);
        ShowWindow(g_hResultEdit, SW_SHOW);
        ShowWindow(g_hBtnSave, SW_SHOW);

        SetWindowTextW(g_hResultEdit,
g_reportText.c_str());

        std::wstring hint = L"Ви можете зберегти звіт у
файл або завершити роботу.";
        SetWindowTextW(g_hHint, hint.c_str());
        ShowWindow(g_hHint, SW_SHOW);

        ShowWindow(g_hProgress, SW_SHOW);
        SendMessageW(g_hProgress, PBM_SETPOS,
g_totalQuestions, 0);

        SetWindowTextW(g_hBtnNext,
L"Завершити");
        EnableWindow(g_hBtnBack, FALSE);
        break;
    }
}

void HandleNext(HWND hWnd) {
    switch (g_step) {
    case AppStep::Intro:
        g_step = AppStep::Questions;
        g_currentCategory = 0;
        g_currentQuestion = 0;
        g_answeredQuestions = 0;
        UpdateUI();
        break;

    case AppStep::Questions:

```

```

    {
        int selectedScore = -1;
        for (int i = 0; i < 5; ++i) {
            if (g_hRadioButtons[i] &&
                SendMessageW(g_hRadioButtons[i],
BM_GETCHECK, 0, 0) == BST_CHECKED) {
                selectedScore = i + 1;
                break;
            }
        }

        if (selectedScore == -1) {
            MessageBoxW(hWnd, L"Будь ласка, оберіть
один із варіантів відповіді.",
                L"Помилка вводу", MB_OK |
MB_ICONWARNING);
            return;
        }

        if (g_currentCategory < g_categories.size()) {
            auto& cat = g_categories[g_currentCategory];
            cat.questions[g_currentQuestion].score =
selectedScore;
            g_answeredQuestions++;
            SendMessageW(g_hProgress,
PBM_SETPOS, g_answeredQuestions, 0);

            g_currentQuestion++;
            if (g_currentQuestion >= cat.questions.size())
            {
                int sum = 0;
                for (auto& q : cat.questions) sum += q.score;
                cat.averageScore =
static_cast<double>(sum) / cat.questions.size();

                g_currentCategory++;
                g_currentQuestion = 0;
            }

            if (g_currentCategory >= g_categories.size())
            {
                UpdateUI();
                return;
            }

            UpdateUI();
        }
        else {
            g_prevAttemptScore = selectedScore - 1;
            g_prevAttemptAsked = true;
            g_answeredQuestions++;
            SendMessageW(g_hProgress,
PBM_SETPOS, g_answeredQuestions, 0);

            ComputeResults();
            g_step = AppStep::Results;
            UpdateUI();
        }
        break;
    }

    case AppStep::Results:
        PostQuitMessage(0);
        break;
    }
}

void HandleBack(HWND) {
}

#define IDC_TITLE 101
#define IDC_TEXT 102
#define IDC_HINT 104
#define IDC_BTN_BACK 105
#define IDC_BTN_NEXT 106
#define IDC_PROGRESS 107
#define IDC_RESULT_EDIT 108
#define IDC_BTN_SAVE 109

#define IDC_BTN_SETTINGS 120
#define IDC_SETTINGS_PANEL 121
#define IDC_EDIT_W1 130
#define IDC_EDIT_W2 131
#define IDC_EDIT_W3 132
#define IDC_EDIT_W4 133
#define IDC_EDIT_W5 134
#define IDC_EDIT_PENALTY 135
#define IDC_BTN_APPLY_SETTINGS 136

#define IDC_RADIO_BASE 200

LRESULT CALLBACK WndProc(HWND hWnd,
UINT msg, WPARAM wParam, LPARAM lParam) {
    switch (msg) {
        case WM_CREATE:
            {
                g_hFont = CreateFontW(
                    18, 0, 0, 0, FW_NORMAL, FALSE, FALSE,
FALSE,
                    DEFAULT_CHARSET,
OUT_DEFAULT_PRECIS, CLIP_DEFAULT_PRECIS,
                    CLEARTYPE_QUALITY,
DEFAULT_PITCH | FF_DONTCARE, L"Segoe UI");

                RECT rc;
                GetClientRect(hWnd, &rc);
                int width = rc.right - rc.left;
                int height = rc.bottom - rc.top;

                g_hTitle = CreateWindowExW(
                    0, L"STATIC", L"",
                    WS_CHILD | WS_VISIBLE,
                    10, 10, width - 20, 30,
                    hWnd, (HMENU)IDC_TITLE, nullptr, nullptr
                );

                g_hText = CreateWindowExW(
                    0, L"STATIC", L"",
                    WS_CHILD | WS_VISIBLE | SS_LEFT,
                    10, 50, width - 300, 200,
                    hWnd, (HMENU)IDC_TEXT, nullptr, nullptr
                );

                g_hHint = CreateWindowExW(
                    0, L"STATIC", L"",
                    WS_CHILD | WS_VISIBLE | SS_LEFT,
                    10, 340, width - 20, 40,
                    hWnd, (HMENU)IDC_HINT, nullptr, nullptr
                );

                g_hBtnBack = CreateWindowExW(
                    0, L"BUTTON", L"Назад",
                    WS_CHILD | WS_VISIBLE |
BS_PUSHBUTTON,
                    10, height - 50, 100, 30,
                    hWnd, (HMENU)IDC_BTN_BACK, nullptr,
nullptr
                );

                g_hBtnNext = CreateWindowExW(

```

```

    0, L"BUTTON", L"Далі",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE |
BS_PUSHBUTTON,
    width - 110, height - 50, 100, 30,
    hWnd, (HMENU)IDC_BTN_NEXT, nullptr,
    nullptr
);

g_hProgress = CreateWindowExW(
    0, PROGRESS_CLASSW, nullptr,
    WS_CHILD | WS_VISIBLE,
    width / 4, height - 45, width / 2, 20,
    hWnd, (HMENU)IDC_PROGRESS, nullptr,
    nullptr
);

g_hResultEdit = CreateWindowExW(
    WS_EX_CLIENTEDGE, L"EDIT", L"",
    WS_CHILD | ES_MULTILINE |
ES_AUTOVSCROLL | ES_READONLY | WS_VSCROLL,
    10, 50, width - 20, height - 120,
    hWnd, (HMENU)IDC_RESULT_EDIT,
    nullptr, nullptr
);

g_hBtnSave = CreateWindowExW(
    0, L"BUTTON", L"Зберегти звіт",
    WS_CHILD | BS_PUSHBUTTON,
    width - 230, height - 50, 110, 30,
    hWnd, (HMENU)IDC_BTN_SAVE, nullptr,
    nullptr
);

int rbX = 20;
int rbY = 260;
int rbW = width - 350;
int rbH = 24;

for (int i = 0; i < 5; ++i) {
    DWORD style = WS_CHILD |
BS_AUTORADIOBUTTON;
    if (i == 0) style |= WS_GROUP;
    g_hRadioButtons[i] = CreateWindowExW(
        0, L"BUTTON", ANSWER_OPTIONS[i],
        style,
        rbX, rbY + i * (rbH + 2), rbW, rbH,
        hWnd, (HMENU)(IDC_RADIO_BASE +
i), nullptr, nullptr
    );
}

g_hBtnSettings = CreateWindowExW(
    0, L"BUTTON", L"Налаштування...",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE |
BS_PUSHBUTTON,
    width - 230, 10, 200, 30,
    hWnd, (HMENU)IDC_BTN_SETTINGS,
    nullptr, nullptr
);

g_hSettingsPanel = CreateWindowExW(
    WS_EX_CLIENTEDGE, L"STATIC", L"",
    WS_CHILD | SS_LEFT,
    width - 280, 50, 260, 260,
    hWnd, (HMENU)IDC_SETTINGS_PANEL,
    nullptr, nullptr
);

int spX = 10, spY = 10, spW = 240, spH = 20;

```

```

CreateWindowExW(0, L"STATIC",
L"Налаштування моделі:",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE, spX, spY, spW,
    spH,
    g_hSettingsPanel, nullptr, nullptr, nullptr);
spY += 25;

const wchar_t* weightLabels[5] = {
    L"w1 – Освітня ефективність:",
    L"w2 – Технічна готовність:",
    L"w3 – Фінансові можливості:",
    L"w4 – Кадрова готовність:",
    L"w5 – Контент та інтеграція:"
};

int editW = 70;
for (int i = 0; i < 5; ++i) {
    CreateWindowExW(0, L"STATIC",
weightLabels[i],
    WS_CHILD | WS_VISIBLE,
    spX, spY, spW - editW - 10, spH,
    g_hSettingsPanel, nullptr, nullptr, nullptr);

    g_hWeightEdits[i] = CreateWindowExW(
        WS_EX_CLIENTEDGE, L"EDIT", L"",
        WS_CHILD | WS_VISIBLE |
ES_AUTOHSCROLL,
        spX + (spW - editW - 10), spY - 2, editW,
        spH + 4,
        g_hSettingsPanel,
        (HMENU)(IDC_EDIT_W1 + i), nullptr, nullptr
    );
    spY += 24;
}

spY += 10;
CreateWindowExW(0, L"STATIC", L"a –
коефіцієнт штрафу:",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE,
    spX, spY, spW - editW - 10, spH,
    g_hSettingsPanel, nullptr, nullptr, nullptr);

g_hPenaltyEdit = CreateWindowExW(
    WS_EX_CLIENTEDGE, L"EDIT", L"",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE |
ES_AUTOHSCROLL,
    spX + (spW - editW - 10), spY - 2, editW, spH
+ 4,
    g_hSettingsPanel,
    (HMENU)IDC_EDIT_PENALTY, nullptr, nullptr
);

spY += 35;
g_hBtnApplySettings = CreateWindowExW(
    0, L"BUTTON", L"Застосувати",
    WS_CHILD | WS_VISIBLE |
BS_PUSHBUTTON,
    spX, spY, 120, 28,
    g_hSettingsPanel,
    (HMENU)IDC_BTN_APPLY_SETTINGS, nullptr, nullptr
);

HWND controls[] = {
    g_hTitle, g_hText, g_hHint,
    g_hBtnBack, g_hBtnNext, g_hProgress,
    g_hResultEdit, g_hBtnSave, g_hBtnSettings,
    g_hSettingsPanel
};
for (HWND hCtrl : controls) {
    if (hCtrl && g_hFont) {

```

```

        SendMessageW(hCtrl, WM_SETFONT,
(WPARAM)g_hFont, TRUE);
    }
    for (int i = 0; i < 5; ++i) {
        if (g_hRadioButtons[i] && g_hFont) {
            SendMessageW(g_hRadioButtons[i],
WM_SETFONT, (WPARAM)g_hFont, TRUE);
        }
        if (g_hWeightEdits[i] && g_hFont) {
            SendMessageW(g_hWeightEdits[i],
WM_SETFONT, (WPARAM)g_hFont, TRUE);
        }
    }
    if (g_hPenaltyEdit && g_hFont) {
        SendMessageW(g_hPenaltyEdit,
WM_SETFONT, (WPARAM)g_hFont, TRUE);
    }
    if (g_hBtnApplySettings && g_hFont) {
        SendMessageW(g_hBtnApplySettings,
WM_SETFONT, (WPARAM)g_hFont, TRUE);
    }

    ShowWindow(g_hSettingsPanel, SW_HIDE);

    for (int i = 0; i < 5; ++i) {
        ShowWindow(g_hRadioButtons[i],
SW_HIDE);
    }

    ShowWindow(g_hResultEdit, SW_HIDE);
    ShowWindow(g_hBtnSave, SW_HIDE);

    UpdateSettingsPanelControls();
    UpdateUI();
    break;
}

case WM_COMMAND:
{
    switch (LOWORD(wParam)) {
        case IDC_BTN_NEXT:
            HandleNext(hWnd);
            break;
        case IDC_BTN_BACK:
            HandleBack(hWnd);
            break;
        case IDC_BTN_SAVE:
            SaveReportToFile(hWnd);
            break;
        case IDC_BTN_SETTINGS:
        {
            if (IsWindowVisible(g_hSettingsPanel)) {
                ShowWindow(g_hSettingsPanel,
SW_HIDE);
            }
            else {
                UpdateSettingsPanelControls();
                ShowWindow(g_hSettingsPanel,
SW_SHOW);
            }
            break;
        }
    }
    case IDC_BTN_APPLY_SETTINGS:
        ApplySettings(hWnd);
        break;
}
}

```

```

case WM_PAINT:
{
    PAINTSTRUCT ps;
    HDC hdc = BeginPaint(hWnd, &ps);

    if (g_step == AppStep::Results) {
        RECT rc;
        GetClientRect(hWnd, &rc);
        RECT chartRc = rc;
        chartRc.left = rc.right / 2;
        chartRc.top = 80;
        chartRc.bottom -= 80;
        DrawRadarChart(hdc, chartRc);
    }

    EndPaint(hWnd, &ps);
    break;
}

case WM_DESTROY:
    if (g_hFont) {
        DeleteObject(g_hFont);
        g_hFont = nullptr;
    }
    PostQuitMessage(0);
    break;

default:
    return DefWindowProcW(hWnd, msg, wParam,
lParam);
}

return 0;
}

int WINAPI wWinMain(HINSTANCE hInstance,
HINSTANCE, PWSTR, int nCmdShow) {
    InitCommonControls();
    InitModel();

    const wchar_t CLASS_NAME[] =
L"AR_EVAL_APP_CLASS";

    WNDCLASSEXW wc = { 0 };
    wc.cbSize = sizeof(wc);
    wc.style = CS_HREDRAW | CS_VREDRAW;
    wc.lpfnWndProc = WndProc;
    wc.hInstance = hInstance;
    wc.hCursor = LoadCursor(nullptr, IDC_ARROW);
    wc.hbrBackground =
(HBRUSH)(COLOR_WINDOW + 1);
    wc.lpszClassName = CLASS_NAME;

    if (!RegisterClassExW(&wc)) {
        MessageBoxW(nullptr, L"Не вдалося
zareєструвати клас вікна.",
L"Помилка", MB_OK | MB_ICONERROR);
        return 0;
    }

    g_hMainWnd = CreateWindowExW(
0,
CLASS_NAME,
L"Оцінка доцільності впровадження AR у
навчальний процес",
WS_OVERLAPPEDWINDOW &
~WS_MAXIMIZEBOX,
CW_USEDEFAULT, CW_USEDEFAULT,
900, 600,
nullptr,
nullptr,

```

```
    hInstance,  
    nullptr  
);  
  
if (!g_hMainWnd) {  
    MessageBoxW(nullptr, L"Не вдалося створити  
головне вікно.",  
                L"Помилка", MB_OK | MB_ICONERROR);  
    return 0;  
}  
  
ShowWindow(g_hMainWnd, nCmdShow);  
UpdateWindow(g_hMainWnd);  
  
MSG msg;  
while (GetMessageW(&msg, nullptr, 0, 0)) {  
    TranslateMessage(&msg);  
    DispatchMessageW(&msg);  
}  
  
return (int)msg.wParam;  
}
```