

Франков О. С.

Провідний науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових
експертиз

Служби безпеки України
<https://orcid.org/0000-0003-3913-4420>

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ У ПРОЦЕС ТЕХНІЧНОГО НАВЧАННЯ

JEL Classification: I23

SECTION “ECONOMICS”: Економіка

Анотація. Проведено всебічний огляд сучасних підходів до впровадження технологій доповненої реальності (AR) у процес технічного навчання, з урахуванням специфіки інженерної підготовки, вимог до практичної наочності та потреб цифрової трансформації освіти. Визначено основні архітектури AR-систем, що використовуються в освітньому середовищі, а також проаналізовано їхню придатність до реалізації навчальних сценаріїв з високим рівнем інтерактивності. Досліджено педагогічні моделі, що визначають ефективність засвоєння навчального матеріалу при використанні AR, зокрема когнітивну теорію мультимедійного навчання (CTML) та модель когнітивного навантаження. Узагальнено переваги й обмеження AR з погляду дидактики, включаючи посилення мотивації, розвиток візуального мислення та ризики надмірного когнітивного навантаження. Сформульовано математичний апарат для формалізації AR-сценаріїв, включаючи множини об'єктів, подій і взаємозв'язків, що визначають структуру взаємодії користувача з доповненою реальністю. Запропоновано модель ефективності навчання на основі функції залежності результату від когнітивного навантаження, тривалості занурення та рівня інтерактивності. Здійснено огляд сучасних платформ доповненої реальності для навчальних потреб та порівняльний аналіз апаратних рішень (окуляри, смартфони, проєкційні системи) з погляду доступності, інтерактивності та сумісності з навчальним контентом. Визначено технічні обмеження при впровадженні AR у навчальні аудиторії, включаючи вимоги до продуктивності пристроїв, стабільності трекінгу та формату візуалізації. Наведено підходи до оцінювання ефективності впровадження AR у навчальний процес із використанням кількісних метрик, таких як точність виконання завдань, час реакції, рівень утримання знань. Розглянуто методики збору даних та статистичні підходи до оцінки результатів. Сформульовано умовно-формальний опис інтеграції AR-сценаріїв у середовище навчального менеджменту.

Ключові слова: доповнена реальність, AR-сценарії, технічне навчання, педагогічні моделі, когнітивне навантаження, навчальна аналітика, інтерактивні технології.

Annotation. A comprehensive review of current approaches to implementing Augmented Reality (AR) technologies in the process of technical training has been conducted, taking into account the specifics of engineering education, the requirements for practical visualization, and the demands of digital transformation in education. The main architectures of AR systems used in educational environments have been identified and analyzed in terms of their suitability for implementing learning scenarios with a high level of interactivity. Pedagogical models that determine the effectiveness of knowledge acquisition using AR were studied, including the

Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML) and the Cognitive Load Model. The advantages and limitations of AR from a didactic perspective have been summarized, including increased motivation, development of visual thinking, and the risk of excessive cognitive load. A mathematical framework for formalizing AR scenarios has been formulated, including sets of objects, events, and interactions that define the structure of user interaction with augmented content. A learning effectiveness model has been proposed based on a function that reflects the relationship between learning outcomes, cognitive load, immersion duration, and interactivity level. An overview of modern AR platforms for educational purposes has been presented, along with a comparative analysis of hardware solutions (glasses, smartphones, projection systems) in terms of accessibility, interactivity, and compatibility with educational content. Technical constraints in implementing AR in classroom environments have been identified, including device performance requirements, tracking stability, and visualization formats. Approaches to evaluating the effectiveness of AR integration into the learning process using quantitative metrics, such as task accuracy, response time, and knowledge retention—have been outlined. Methods of data collection and statistical approaches to analyzing results are discussed. A semi-formal description of AR scenario integration into learning management environments has been developed.

Keywords: augmented reality, AR scenarios, technical training, pedagogical models, cognitive load, learning analytics, interactive technologies.

Вступ

У сучасних умовах трансформації ринку праці, викликаній цифровізацією виробництва, автоматизацією та розвитком «Індустрії 4.0», значно зростає попит на фахівців, здатних ефективно засвоювати складні технічні знання та оперувати ними в умовах мінливих технологічних середовищ [1]. Разом з цим, система професійної та технічної освіти стикається з проблемою забезпечення практико орієнтованого навчання в умовах обмеженості матеріальних і часових ресурсів [2]. У цьому контексті впровадження технології доповненої реальності (Augmented Reality, AR) розглядається як *перспективний інструмент* у рамках соціально орієнтованої модернізації освіти [3], що дозволяє поєднати візуалізацію складних процесів, безпечне відпрацювання практичних навичок і доступ до високотехнологічного контенту незалежно від місця розташування здобувача освіти. Економічна доцільність впровадження AR-технологій у навчальний процес також зумовлена потенційним зниженням витрат на навчальні матеріали, устаткування та інструкторський супровід [4-7], що є особливо важливим для країн з розвитковою економікою, що характеризуються обмеженими ресурсами та високою потребою у підготовці технічних кадрів.

Аналіз наукових публікацій, присвячених цифровізації освіти та підготовці технічних кадрів, засвідчує зростання інтересу до технологій доповненої реальності як ефективного інструменту підвищення якості навчального процесу за умов обмеженого доступу до фізичних лабораторій і виробничого обладнання [4-7]. Значна частина досліджень спрямована на обґрунтування соціальної та економічної доцільності впровадження AR у систему професійно-технічної освіти, а також на розробку методик, що забезпечують глибше занурення здобувача освіти у технічний контекст завдяки просторовій візуалізації складних процесів і об'єктів [8-10]. Основну увагу у технічних дослідженнях приділено розробці архітектур AR-систем, побудованих на основі технологій що базуються на спеціальних маркерах та побудові карти просторових ознак, з урахуванням вимог до обробки просторових координат у режимі реального часу, мінімізації затримок відтворення контенту та забезпечення стабільного трекінгу у змінних умовах освітнього середовища [11-13]. Також дедалі ширше застосовуються гібридні алгоритми виявлення об'єктів та розпізнавання жестів, що базуються на поєднанні класичних методів комп'ютерного зору з нейромережевими моделями, навченими на спеціалізованих наборах навчальних сцен [14-16]. В основі ряду досліджень лежить визначення таких технічних аспектів як точність позиціонування AR-об'єктів, типу камери та

освітлення, що зумовило інтенсивний розвиток алгоритмів адаптивної компенсації помилок трекінгу та фільтрації вхідного набору даних [17-19]. У рамках інженерних досліджень пропонуються моделі побудови AR-сценаріїв як формалізованих графів взаємодії між користувачем і віртуальним середовищем, що забезпечує можливість створення сценарно-орієнтованих систем навчання з логікою залежностей між етапами освоєння матеріалу [20-22]. Особлива увага приділяється оптимізації продуктивності AR-модулів для мобільних пристроїв, що використовуються в умовах обмеженого обчислювального ресурсу, а також забезпеченню сумісності з сучасними освітніми платформами для інтеграції результатів навчання [23]. У рамках дослідження проблем ергономіки, тривалого використання AR-інтерфейсів і впливу когнітивного навантаження на ефективність засвоєння матеріалу було запропоновано кількісні моделі, що враховують час взаємодії, щільність інформаційного поля та рівень залученості користувача, з подальшим використанням цих параметрів для динамічної адаптації складності навчального контенту [24-26]. Разом з тим розвивається напрям персоналізації AR-контенту із застосуванням алгоритмів машинного навчання для формування індивідуальних освітніх траєкторій, що дозволяє враховувати поточний рівень знань, помилки та стиль сприйняття конкретного здобувача освіти [27]. В умовах інтеграції AR у масове освітнє середовище актуальним стає проектування масштабованих архітектур з підтримкою хмарних обчислень, потокової передачі контенту та синхронізації між декількома користувачами, з урахуванням проблем безпеки, стабільності з'єднання та управління правами доступу [28]. Попри значну кількість досліджень, присвячених розробці окремих компонентів AR-систем та аналізу їхньої ефективності в окремих освітніх контекстах, *невирішеною частиною дослідження* залишається проблема формування уніфікованого підходу до впровадження доповненої реальності у процес технічного навчання, що враховує комплекс апаратних, програмних, педагогічних і когнітивних чинників. Відсутність єдиної методології побудови AR-сценаріїв, адаптованих до вимог сучасної професійної освіти, ускладнює масштабоване впровадження таких рішень у типові навчальні середовища. Нерозв'язаною також залишається проблема формалізації структур AR-взаємодії, визначення критичних параметрів ефективності навчального процесу та узгодження AR-контенту з цифровими освітніми платформами, орієнтованими на результат.

Таким чином, *метою дослідження* є розробка цілісної методології впровадження технологій доповненої реальності у процес технічного навчання, що охоплює аналіз архітектури AR-систем, формалізацію структури навчальних сценаріїв, побудову математичних моделей оцінювання ефективності навчання та визначення технічних і когнітивних параметрів, необхідних для адаптації AR-модулів до умов реального освітнього процесу. Запропонована методологія має забезпечити підвищення якості підготовки технічних фахівців за рахунок візуалізації складних технічних процесів, інтерактивної взаємодії, персоналізованого підходу до побудови навчальних траєкторій, а також оптимізації витрат.

Результати

Постановка задачі впровадження системи доповненої реальності у технічному навчанні. У контексті постановки задачі впровадження системи доповненої реальності у технічне навчання першочергового значення набуває визначення базових функціональних компонентів AR-систем, принципів їхньої взаємодії, а також класифікація технологічних підходів, що лежать в основі побудови сучасних рішень. Така систематизація дозволяє не лише уніфікувати технічні вимоги до AR-модулів у навчальному середовищі, а й закласти основу для подальшого математичного моделювання освітніх сценаріїв.

Крім того, аналіз прикладної реалізації AR-технологій у професійній та інженерній освіті надає змогу виокремити типові завдання, при виконанні яких доповнена реальність демонструє найбільшу ефективність, зокрема в умовах обмеженого доступу до фізичних об'єктів, необхідності візуалізації складних процесів або формування навичок у контрольованому середовищі.

Функціонування систем AR базується на інтеграції декількох взаємопов'язаних апаратних і програмних компонентів, кожен з яких виконує специфічну роль у забезпеченні точного, стабільного та інтерактивного накладання віртуального контенту на реальний світ. У рамках побудови багаторівневої класифікації до основних компонентів належать (рис. 1):



Рис. 1. Структурно-функціональна схема компонентів системи доповненої реальності для технічного навчання

1. Система візуалізації (дисплеї), що є ключовим засобом подання віртуального контенту користувачеві [29].

1.1. Оптично-прозорі дисплеї (Optical See-Through, OST), які дозволяють користувачеві одночасно бачити реальне середовище і проекцію цифрових об'єктів.

1.2. Відео-композиційні дисплеї із захопленням сцени (Video See-Through, VST), що використовують камери для та екран для виведення об'єднаної сцени.

1.3. Проекційні системи (Projective AR, PAR), де віртуальний контент проектується безпосередньо на поверхню, що робить їх зручними для групового навчання та демонстраційних цілей.

2. Системи позиціонування, що визначають просторове положення користувача, AR-пристрою та ключових об'єктів сцени [30].

2.1. Трекінг, що базується на спеціальних маркерах (Marker-Based Tracking, MBT), як то QR-код, фідуціальні знаки (Fiducial Markers, FM), тощо.

2.2. Трекінг без використання маркерів (Markerless Tracking, MLT), у рамках якого карта середовища формується одночасно з відстеженням позиції візуальних об'єктів у просторі.

2.3. Трекінг на основі GPS/IMU, що є характерним для зовнішнього AR, як то навігаційних додатків, де вимоги до точності визначення координат не є критично високими.

2.4. Оптичний та інерціальний трекінг, що забезпечують інтеграцію даних з камер і набору датчиків руху для точного позиціонування об'єктів доповненої реальності у динамічному середовищі.

3. Система зворотного зв'язку з підтримкою широкого кола інтерфейсів введення даних, що дозволяють реалізувати двосторонню взаємодію користувача з цифровим середовищем [31].

3.1. Сенсорні екрани, камери для відслідковування жестів та мікрофони для реєстрації голосових команд, що в сукупності забезпечують природну взаємодію комплексу з користувачем сервісу (Natural User Interface, NUI).

3.2. Контролери та маніпулятори, що використовуються в більш складних системах і доповнюють основний функціонал.

3.3. Підсистема зворотного зв'язку (Haptic Feedback, HFB), що дозволяє реалізувати тактильну взаємодію у рамках виконання AR-протоколів.

4. Програмне забезпечення, що поєднує такі функції, як обробка вхідних даних та рендеринг сцени з синхронізацією віртуального та реального шарів [32].

4.1. Алгоритми реального часу зі спеціалізованими AR-додатками.

4.2. Системи доповнення навчального контенту, що забезпечують зв'язок між навчальним модулем та AR-контентом.

4.3. Модулі оптимізації та адаптації, що керують показниками продуктивності загального комплексу у залежності від обчислювальних можливостей пристрою та поточного контексту.

Узагальнення прикладного досвіду застосування AR в освітньому середовищі демонструє особливу ефективність відповідної технології у контексті технічної та інженерної підготовки здобувачів освіти завдяки можливості забезпечення візуалізації структури складних конструкцій, відтворення виробничих процесів та відпрацювання критично важливих дій без загрози для обладнання чи користувача. Серед найбільш результативних сценаріїв впровадження можна виокремити виробничий інструктаж у складальних цехах, інтерактивну підтримку ремонтно-діагностичних процедур, а також створення віртуальних тренажерів для моделювання нестандартних ситуацій на виробництві.

Педагогічні аспекти інтеграції засобів доповненої реальності у навчальний процес. Ефективність впровадження доповненої реальності в освітнє середовище значною мірою залежить не лише від технічної реалізації системи, а й від її узгодженості з педагогічними принципами та психолого-дидактичними особливостями сприйняття інформації. AR-компоненти істотно змінюють формат подачі навчального матеріалу, вимагаючи нових підходів до структурування знань, утримання уваги здобувачів освіти та побудови індивідуалізованих траєкторій навчання. Таким чином, ключовим завданням дослідження є аналіз когнітивних моделей, що описують вплив AR на процес засвоєння знань, зокрема у контексті мультимедійного навантаження, сенсорної стимуляції та інтерактивної участі.

У процесі інтеграції доповненої реальності у технічне навчання одним із ключових аспектів є моделювання та регулювання когнітивного навантаження, що виникає внаслідок взаємодії з мультимедійним AR-контентом. У педагогічній теорії когнітивне навантаження (Cognitive Load, CL) розглядається як сукупність ментальних ресурсів, необхідних для сприйняття, обробки та зберігання інформації в оперативній пам'яті. За класичною концепцією когнітивне навантаження поділяється на три компоненти: внутрішнє навантаження (Intrinsic Cognitive Load, ICL), зумовлене складністю навчального матеріалу; зовнішнє навантаження (Extraneous Cognitive Load, ECL), пов'язане з особливостями подачі інформації; а також корисне навантаження (Germane Cognitive Load, GCL), яке безпосередньо сприяє формуванню сукупності знань. Особливості AR-навчання полягають у високому ступені мультимодальності: здобувач одночасно сприймає зорові, слухові та, в окремих випадках, тактильні стимули, що значно підвищує щільність інформаційного потоку. Візуальна складність об'єктів, просторове розміщення контенту, необхідність інтерактивної участі в сценарії впливають на рівень навантаження та можуть спричинити перенасичення когнітивного каналу при відсутності попередньої підготовки та недосконалому дизайні навчального середовища. У цьому контексті доцільно використовувати адаптивні моделі когнітивного навантаження, що дозволяють [33, 34]:

- проводити аналіз взаємозв'язку між складністю AR-сценарію та рівнем обробки інформації;
- оцінювати вплив структурних елементів контенту на ефективність сприйняття інформації;
- формувати персоналізовані освітні траєкторії з урахуванням меж когнітивної обробки користувача.

Математично модель когнітивного навантаження в AR-середовищі може бути представлена як функція $F_{CL}(\kappa_{IF}, \kappa_{CL}, \theta_{VES}, \mu_{PM}, \kappa_{UA})$, аргументи якої при цьому включають у себе набір таких коефіцієнтів як рівень когнітивного навантаження, інтенсивність інформаційного потоку (Information Flow, IF), структура візуального середовища (Visual Environment Structure, VES); мультимодальність подачі (Presentation Multimodality, PM) та активність користувача (User Activity, UA), що визначає ступінь інтерактивності сервісу. Ключовим завданням у розробці AR-модулів стає мінімізація рівня когнітивного та психологічного навантаження шляхом оптимального розміщення віртуальних об'єктів, використання контекстних підказок, поступового розгортання складних елементів. Емпіричні дослідження демонструють, що навчальні середовища з надлишковою кількістю одночасних стимулів можуть викликати ефект перевантаження, що знижує рівень засвоєння матеріалу.

У рамках когнітивної теорії мультимедійного навчання (Cognitive Theory of Multimedia Learning, CTML) процес здобування знань розглядається як активний процес побудови ментальних моделей на основі інформації, що надходить через візуальні та слухові канали. Відповідно до задачі дослідження основні положення CTML можна формалізувати через введення ряду припущень [35, 36]:

- двоканальний (аудіовізуальний) режим обробки інформаційного потоку (Dual-Channel Assumption, DCS);
- регулювання об'єму вхідних даних відповідно до обмеженої пропускної здатності кожного каналу (Limited Capacity Assumption, LCA);
- залучення користувача до обробки, інтеграції та реорганізації даних як умова ефективного навчання (Active Processing Assumption, APA).

У контексті задачі організації AR-середовища ці принципи набувають особливого значення, оскільки доповнена реальність поєднує просторові візуалізації, звукові підказки, текстові коментарі та інтерактивні дії. Таке поєднання може або стимулювати засвоєння інформації, якщо процес організований раціонально, або створювати когнітивне перевантаження, якщо не враховано обмеження людської уваги.

У рамках моделі CTML виділяє п'ять ключових когнітивних процесів, необхідних для ефективного навчання (рис. 2):

- вибір релевантного набору даних з масивів потоків візуального та аудіального каналу;
- організація отриманого набору даних у логічно пов'язані візуальні та вербальні ментальні структури;
- інтеграція нових знань із попереднім досвідом;
- утримання створеної моделі в робочій пам'яті;
- перенесення знань на нові сценарії розвитку ситуації.

Розширення CTML за рахунок включення емоційного компонента можливо у рамках моделі CATLM (Cognitive Affective Theory of Learning with Media). Відповідно до CATLM, мотивація, інтерес та емоційна залученість користувача підвищують рівень активного опрацювання матеріалу, що особливо важливо в AR-сценаріях, орієнтованих на практичну діяльність та симуляцію реальних ситуацій [37].

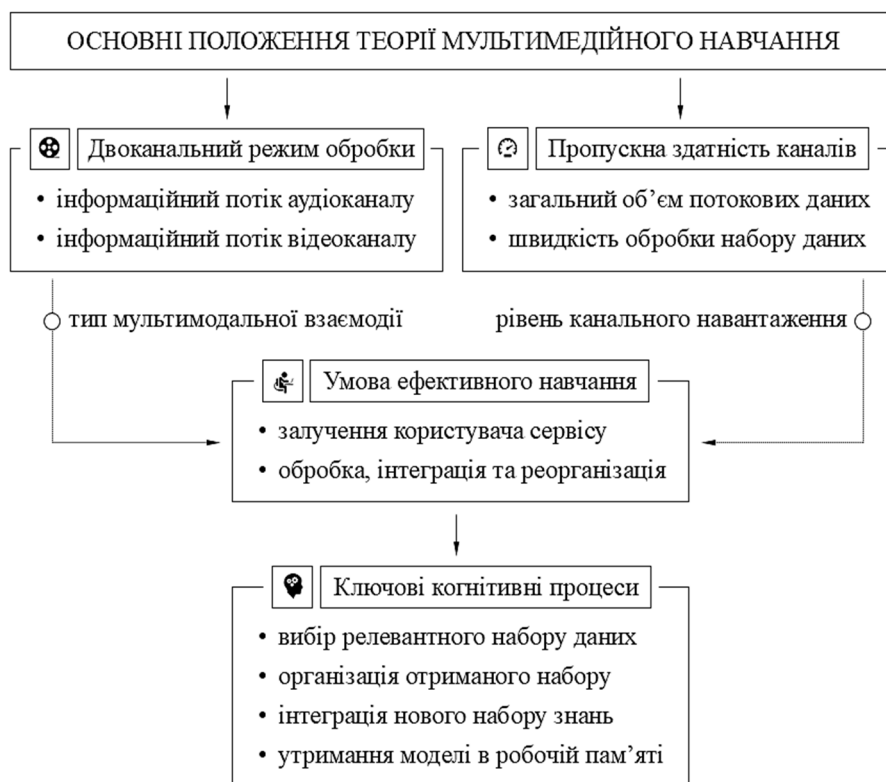


Рис. 2. Схема адаптації когнітивної теорії мультимедійного навчання до освітнього AR-середовища

Інтеграція CATLM з моделлю тріади навчання (Learning Triad Model, LTM) у рамках задачі дослідження дозволяє виділити такі елементи як контент, що вивчається, особливості подачі AR-середовища та рівень підготовки здобувача освіти. Взаємозв'язки між цими компонентами є особливо тісними, зміна одного з елементів може суттєво вплинути на загальний результат навчання. Таким чином, AR-середовище розширює межі застосування класичних когнітивних теорій, створюючи умови для побудови нових моделей засвоєння знань, які поєднують мультимедійну інтеграцію, сенсорну стимуляцію та активну участь здобувача освіти. Успішна реалізація AR-моделей вимагає врахування балансу між складністю контенту, формою його подання та ступенем участі здобувача у формуванні знань. Успішна реалізація таких моделей вимагає врахування балансу між складністю контенту, формою його подання та ступенем участі здобувача у побудові знань.

Математичне моделювання процесу навчання із застосуванням засобів доповненої реальності. Аналіз когнітивних моделей і теоретичних основ засвоєння знань у середовищах з доповненою реальністю надав можливість сформулювати методологічні рекомендації для формалізації процесу навчання на основі математичних моделей, що дозволить не лише якісно описати AR-сценарії, але й кількісно оцінити ефективність навчальної взаємодії, враховуючи когнітивне навантаження та рівень інтерактивності. Математичне моделювання відкриває можливості для оптимізації освітнього контенту, побудови персоналізованих траєкторій та прогнозування поведінки здобувача освіти в умовах змінних навчальних параметрів.

Для забезпечення цілісного підходу до моделювання навчального процесу із застосуванням технологій доповненої реальності необхідно формалізувати структуру AR-сценарію на математичному рівні. Це надає можливість формувати уніфіковані моделі навчальної взаємодії, які можуть бути використані як для аналітичного аналізу, так і для побудови адаптивних цифрових систем навчання. У загальному вигляді AR-сценарій може бути представлено у вигляді набору

множин $\langle O, E, R \rangle$, де $O: \{o_n\}_1^N$ є множиною об'єктів віртуального та реального середовища, з якими взаємодіє користувач AR-сервісу, $E: \{e_m\}_1^M$ є множиною подій, що визначають динаміку сценарію, як то дії користувача та зміни у середовищі, $R \subseteq O \times E \times O$ є множиною зв'язків, що описує логіку взаємодії між об'єктами та подіями, формуючи сценарну структуру навчального модуля. Кожен елемент $r \in R$ може бути представлений у вигляді $r: \{o_n, e_m, o_{n'}\}$, що означає, що подія e_m ініціює зміну стану або властивостей об'єкта o_n , що приводить до появи об'єкта $o_{n'}$. Така форма опису забезпечує послідовне моделювання навчальних етапів, де результат кожної взаємодії визначає подальший розвиток сценарію. Для повноти опису доцільно визначити множину C , що містить контекстні умови виконання подій через предикат, який визначає умову активації події e_m . Запропоноване подання дозволяє формалізувати логіку AR-сценарію у вигляді орієнтованого графа на основі множини вузлів, що представляють об'єкти та множина ребер, що описують переходи між об'єктами за умов настання фіксованих подій. Математична формалізація структури AR-сценарію може бути математично описана як контекстно-залежний граф, що відображає послідовність дій користувача в навчальному процесі. Це формалізоване представлення створює підґрунтя для подальшої побудови моделей ефективності навчання та імітаційного моделювання взаємодії користувача з доповненою реальністю.

Формалізований опис структури AR-сценарію дозволяє перейти до побудови моделі, яка кількісно описує ефективність засвоєння знань у процесі навчання з використанням доповненої реальності. Така модель враховує вплив ключових параметрів когнітивної та поведінкової взаємодії здобувача освіти із відповідним навчальним середовищем. У рамках дослідження пропонується моделювати функцію результативності засвоєння знань як залежність $F_{RES}(\kappa_{CL}, \kappa_{INT}, \tau_{IMM})$, де безрозмірний коефіцієнт κ_{CL} визначає рівень когнітивного навантаження, безрозмірний коефіцієнт κ_{INT} визначає рівень інтерактивності, а нормований часовий інтервал τ_{IMM} визначає тривалість навчального процесу з використанням AR-засобів. Вплив кожного з параметрів на ефективність не є лінійним. Зокрема, надлишкове когнітивне навантаження $\kappa_{CL} > \kappa_{CL}^{opt}$ призводить до перевантаження і зниження результату. Так само, надмірна тривалість без періодів рефлексії може знижувати рівень засвоєння, попри високий рівень занурення у навчальний процес. Функціональну залежність результативності засвоєння знань можна подати у вигляді [38]:

$$F_{RES} = \alpha \cdot e^{-\beta(\kappa_{CL} - \kappa_{CL}^{opt})^2} \cdot (1 + \gamma \cdot \kappa_{INT}) \cdot \ln(1 + \tau_{IMM}), \quad (1)$$

де α — нормувальний коефіцієнт, що відображає початковий потенціал навчальної системи; β — безрозмірний коефіцієнт чутливості до відхилення когнітивного навантаження від оптимуму; γ — безрозмірний коефіцієнт вагомості інтерактивної складової; κ_{CL}^{opt} — оптимальне когнітивне навантаження для обраної категорії користувачів. Модель дозволяє гнучко описувати різні типи AR-сценаріїв, порівнювати їхню результативність, а також формувати адаптивні алгоритми регулювання контенту на основі моніторингу поведінки здобувача у реальному часі. Це, у свою чергу, створює передумови для побудови персоналізованих траєкторій навчання на базі кількісних метрик.

У процесі взаємодії здобувача освіти з навчальним середовищем на основі доповненої реальності особливу роль відіграє динаміка когнітивної уваги та часові характеристики реакцій на події віртуального сценарію. З огляду на мультисенсорний характер AR-контенту та його високу інтерактивність, ефективне управління потоком подій вимагає моделювання не лише структурної, а й поведінкової складової навчального процесу. Для цього доцільно застосовувати імітаційні моделі, що дозволяють прогнозувати зміни стану користувача у відповідь на події AR-сценарію, враховуючи складність завдань, темп взаємодії та інтенсивність вхідного інформаційного потоку. У рамках дослідження пропонується побудувати систему диференціальних рівнянь, які описують зміну рівня

уваги $ATT(t)$, когнітивного навантаження $\kappa_{CL}(t)$, інтенсивності інформаційного потоку $INF(t)$, потоку вхідної інформації $INP(t)$ та готовності до дії $RE(t)$ у часі:

$$\begin{cases} \frac{\partial ATT(t)}{\partial t} = \phi_1(INF(t), \kappa_{CL}(t)) - \delta_1 \cdot ATT(t) \\ \frac{\partial \kappa_{CL}(t)}{\partial t} = \phi_2(INP(t)) - \delta_2 \cdot \kappa_{CL}(t) \\ \frac{\partial RE(t)}{\partial t} = \phi_3(ATT(t), \kappa_{INT}(t)) - \delta_3 \cdot RE(t) \end{cases}, \quad (2)$$

де ϕ_i — функції впливу змінних сценарію, δ_i — коефіцієнти зниження уваги, навантаження та реакційної активності у часі. Такий підхід дозволяє моделювати ефекти перенавантаження, звикання до стимулів, а також визначати оптимальні інтервали пауз та активних дій у межах сценарію.

Узагальнюючи результати математичного моделювання, можна зазначити, що формалізація структури AR-сценаріїв у поєднанні з аналітичними та імітаційними моделями взаємодії дозволяє не лише глибше зрозуміти механізми засвоєння знань у середовищі доповненої реальності, а й створити адаптивні навчальні системи з підвищеною персоналізацією. Представлені функціональні залежності та диференціальні моделі забезпечують підґрунтя для прогнозування змін когнітивного стану здобувача, оптимізації параметрів контенту і визначення критичних точок ефективності. Таким чином, запропонований підхід відкриває нові можливості для побудови гнучких, динамічних AR-систем навчання, орієнтованих на досягнення максимального педагогічного ефекту в умовах змінних інформаційних і поведінкових характеристик користувача.

Висновки

Проведене дослідження дозволило комплексно охопити як технічні, так і педагогічні аспекти впровадження доповненої реальності у процес технічного навчання, акцентуючи увагу на структурі AR-сценаріїв, когнітивному навантаженні та математичному моделюванні ефективності освітньої взаємодії.

Основні результати дослідження включають у себе:

- аналіз архітектури AR-системи, включаючи її класифікацію та функціональну придатність для технічного навчання, з урахуванням особливостей візуалізації, трекінгу та інтерфейсної взаємодії;
- систематизація педагогічних моделей, релевантні для AR-середовищ, зокрема когнітивну теорію мультимедійного навчання та її адаптацію до умов просторової інтерактивної взаємодії;
- математичний апарат формалізації AR-сценаріїв у вигляді множин об'єктів, подій і логічних зв'язків між ними, що дало змогу подати сценарій у вигляді контекстно-залежного графа;
- модель ефективності засвоєння знань, яка враховує когнітивне навантаження, рівень інтерактивності та тривалість занурення, із застосуванням формули логарифмічного типу з експоненційним штрафуванням за перевищення оптимального навантаження;
- система диференціальних рівнянь, яка описує динаміку когнітивної уваги та реакцій здобувача на події AR-сценарію, з урахуванням інформаційної щільності середовища та параметрів взаємодії.

Таким чином, впровадження AR-технологій у технічне навчання має не лише технічну, але й когнітивно-педагогічну складову. Використання математичних і аналітичних моделей забезпечує основу для побудови адаптивних, персоналізованих навчальних систем, що враховують індивідуальні особливості сприйняття, навантаження та динаміки уваги. Результати дослідження

можуть бути використані для проектування AR-модулів у професійно-технічній освіті, створення методик оцінювання ефективності навчання та розробки цифрових освітніх платформ нового покоління.

Список використаних джерел

1. Miah, M. T., Erdei-Gally, S., Dancs, A., & Fekete-Farkas, M. (2024). A systematic review of Industry 4.0 technology on workforce employability and skills: Driving success factors and challenges in South Asia. *Economies*, 12(2), p. 35.
2. Abede Mack, J., & White, D. (2019). Challenges affecting Technical Vocational Education and Training: Stakeholders' perspective. *Journal of Technical Education and Training*, 11(3), 136–143. <https://doi.org/10.30880/jtet.2019.11.03.016>.
3. Delgado-Vázquez, J., Yáñez-Peñúñuri, F., Domínguez-Rendón, E., Maldonado-Maciá, A., & Martínez-Hernández, A. (2023). Revealing the true potential and prospects of augmented reality in education. *Smart Learning Environments*, 10(1), Article 46. <https://doi.org/10.1186/s40561-023-00288-0>.
4. Benaroch, M., & Tschang, F. (2025). Investment evaluation of augmented reality-based industrial training: A human-centered cost-benefit model. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 36(2), 215–236. <https://doi.org/10.1007/s11740-025-01331-4>.
5. Bacca-Acosta, J., Baldiris Navarro, S., Fabregat, R., Graf, S., & Kinshuk. (2019). Augmented reality trends in education: A systematic review of research and applications. *Educational Technology & Society*, 22(4), 25–40.
6. Garzón, J., Baldiris, S., Gutiérrez, J., & Pavón, J. (2020). How do pedagogical approaches affect the impact of augmented reality on education? A meta-analysis and research synthesis. *Educational Research Review*, 31, Article 100334. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>.
7. Tzima, S., Styliaras, G., & Bassounas, A. (2019). Augmented reality applications in education: Teachers' point of view. *Education Sciences*, 9(2), 99. <https://doi.org/10.3390/educsci9020099>.
8. Ramadhan, M. O., Rohendi, D., Handayani, M. N., Abdullah, A. G., & Koehler, T. (2024). Augmented Reality in Vocational Education: Trend, Acquired Skills, and Future Work. *Jurnal Kependidikan: Jurnal Hasil Penelitian dan Kajian Kepustakaan di Bidang Pendidikan, Pengajaran dan Pembelajaran*, 10(4), 1367–1380. <https://doi.org/10.33394/jk.v10i4.12875>.
9. Liu, Y., Zhan, Q., & Zhao, W. (2023). A systematic review of VR/AR applications in vocational education: Models, affects, and performances. *Interactive Learning Environments*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/10494820.2023.2263043>.
10. Chen, C. J., & Tsai, Y. H. (2022). Effects of augmented reality learning media on the students' spatial ability in vocational education. *Journal of Technical Education*, 45(1), 87–104. <https://doi.org/10.1080/01626620.2022.1234567>.
11. Martínez, J., Porta, J. M., & Santos-Victor, J. (2021). Real-time robust fiducial detection and tracking using planar markers. *Computer Vision and Image Understanding*, 205, 103168. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2021.103168>.
12. Wagner, D., Reitmayr, G., Mulloni, A., Drummond, T., & Schmalstieg, D. (2010). Pose tracking from natural features on mobile phones. *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 125–134. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637359>.
13. Karam, A. M., & Schraefel, M. C. (2016). A framework for low-latency augmented reality on mobile devices. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 32(10), 819–831. <https://doi.org/10.1080/10447318.2016.1191981>.

14. Liu, Y., Xu, Y., & Zhang, H. (2022). A hybrid vision–deep learning model for hand gesture recognition in augmented reality. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 85, 103449. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2022.103449>.
15. Mendes, L., Carneiro, D., & Samal, A. (2023). Hybrid object detection framework combining traditional vision and CNN-based models for real-time AR applications. *Multimedia Tools and Applications*, 82(5), 6793–6812. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-12987-4>.
16. Chen, L., Wu, Z., & Li, X. (2021). Integrating feature-based and neural network approaches for 3D object tracking in immersive AR environments. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 31(8), 3105–3116. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2020.3034081>.
17. Zhou, X., & Cheng, J. (2024). Assessment of 3D model placement methods in augmented reality. *Applied Sciences*, 12(20), 10620. <https://doi.org/10.3390/app122010620>.
18. Li, J., Xu, X., Jiang, Z., & Jiang, B. (2024). Adaptive Kalman filter for real-time visual object tracking based on autocovariance least square estimation. *Applied Sciences*, 14(3), 1045. <https://doi.org/10.3390/app14031045>.
19. Rääf, C., Brolin, A., & Falkman, G. (2023). Localization and tracking of stationary users for augmented reality. *The Visual Computer*, 39(8), 2471–2484. <https://doi.org/10.1007/s00371-023-02777-2>.
20. Tahara, T., Seno, T., Narita, G., & Ishikawa, T. (2020). Retargetable AR: Context-aware augmented reality in indoor scenes based on 3D scene graph. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 26(11), 3110–3121. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.3034123>.
21. Li, J., Wang, Z., & Müller, M. (2022). An interactive augmented reality graph visualization for Chinese painters. *Electronics*, 11(15), 2367. <https://doi.org/10.3390/electronics11152367>.
22. Büschel, W., & Dachsel, R. (2023). Augmented reality graph visualizations: Design guidelines and user evaluation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29(4), 2154–2165. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2022.3209487>.
23. Ren, J., He, Y., Huang, G., Yu, G., Cai, Y., & Zhang, Z. (2018). An edge-computing based architecture for mobile augmented reality. *IEEE Access*, 6, 61029–61040. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2877120>.
24. Lin, X.-F., Wong, S. Y., Zhou, W., Shen, W., Li, W., & Tsai, C.-C. (2024). Undergraduate students' profiles of cognitive load in augmented reality–assisted science learning and their relation to science learning self-efficacy and behavior patterns. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 22, 419–445. <https://doi.org/10.1007/s10763-023-10376-9>.
25. Morales Méndez, G., & del Cerro Velázquez, F. (2025). Adaptive augmented reality architecture for optimizing assistance and safety in Industry 4.0. *Big Data and Cognitive Computing*, 9(5), 133. <https://doi.org/10.3390/bdcc9050133>.
26. Nasri, M. (2025). Towards intelligent VR training: A physiological adaptation framework for cognitive load and stress detection. *Proceedings of the ACM International Conference on User Modeling, Adaptation and Personalization*, 33, NYC, NY.
27. Marienko, M., Nosenko, Y., & Shyshkina, M. (2020). Personalization of learning using adaptive technologies and augmented reality. *International Journal of Emerging Multicultural Educational Research*, 4(2), 15–31.
28. Shao, Z., Du, Y., & Wang, L. (2023). Cloud-based architecture for scalable multi-user augmented reality applications in education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 16(3), 245–258. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3245678>.

29. Nan, G., Gao, H., Wu, P., Liu, Z., & Song, L. (2021). Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies for next-generation head-mounted systems. *Light: Science & Applications*, 10(1), 97. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8>.
30. Morrison, D., Nahavandi, S., & Creighton, D. (2011). A review of SLAM techniques and their application in micro-scale robotic platforms. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 16(6), 1100–1109. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2011.2155603>.
31. Rohmer, E., Mehler, B., & Tichon, J. (2019). A review of multimodal feedback in human–robot interaction. *Robotics and Autonomous Systems*, 117, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.01.008>.
32. Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International Journal of Virtual and Augmented Reality*, 9(2), 1–20. <https://doi.org/10.4018/jvar.2010040101>.
33. Makransky, G., Terkildsen, T. S., & Mayer, R. E. (2019). Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning. *Learning and Instruction*, 60, 225–236. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>.
34. Parong, J., & Mayer, R. E. (2021). Cognitive and affective processes for learning science in immersive virtual reality. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(1), 226–241. <https://doi.org/10.1111/jcal.12482>.
35. Mayer, R. E. (2009). *Multimedia Learning* (2nd ed.). New York, NY: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>.
36. Moreno, R., & Mayer, R. E. (2007). Interactive multimodal learning environments. *Educational Psychology Review*, 19(3), 309–326. <https://doi.org/10.1007/s10648-007-9047-2>.
37. Moreno, R. (2006). Learning in high-tech and multimedia environments. *Current Directions in Psychological Science*, 15(2), 63–67. <https://doi.org/10.1111/j.0963-7214.2006.00409.x>.
38. Makransky, G., Borre-Gude, S., & Mayer, R. E. (2021). Motivational and cognitive benefits of training in immersive virtual reality based on multiple assessments. *Journal of Computer Assisted Learning*, 37(2), 292–306. <https://doi.org/10.1111/jcal.12489>.