

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

НІКІТІН ВІТАЛІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 004.946:37.091.64

ДИСЕРТАЦІЯ
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО
КОНТЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі інформаційних технологій зі спеціальності 126 – Інформаційні системи та технології

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

_____ В.О. Нікітін

Науковий керівник – Васюта Світлана Петрівна, кандидат технічних наук, доцент

Львів - 2026

АНОТАЦІЯ

Нікітін В.О. Інформаційна технологія створення навчального контенту з використанням доповненої реальності. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 126 «Інформаційні системи та технології». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2026.

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що ґрунтується на інтегрованому застосуванні методів багатокритеріального аналізу для вибору AR-платформи та реалізації AR-контенту у структурі навчальних видань.

Акцентовано увагу на зростанні ролі цифрових технологій у сучасній освіті, проблемам інтеграції інформаційних систем у навчальні процеси, а також необхідності розроблення адаптивних систем, здатних ефективно реагувати на індивідуальні потреби учасників освітнього процесу.

Практичною реалізацією результатів дисертаційного дослідження є побудова структурно-функціональної моделі інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що визначає взаємозв'язки між етапами формування AR-контенту, вибором AR-платформи та його інтеграцією у структуру навчальних видань.

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У **вступі** підкреслено важливість обраної тематики, що стосується використання доповненої реальності для створення навчального контенту. Акцентовано увагу на збільшені зацікавленості до навчального матеріалу в освітній сфері, складнощах впровадження доповненої реальності в навчальний процес.

Продемонстровано взаємозв'язок виконаного дослідження з науковою роботою кафедри мультимедійних технологій, спрямованою на розвиток сучасних інформаційних технологій створення цифрового освітнього

контенту та впровадження імерсивних технологій у навчальний процес. Сформульовано мету дослідження – розроблення інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності. Визначено основні завдання дослідження та обґрунтовано наукову новизну роботи, яка полягає у побудові інтегрованої моделі прийняття рішень на основі методів багатокритеріального аналізу для вибору оптимальної платформи створення AR-контенту та його інтеграції у структуру навчальних видань.

Описано особистий вклад автора, що охоплює розробку моделей і методик, а також спільні публікації з науковим керівником. Результати дослідження було представлено на науково-практичних конференціях. Підсумовано структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі визначено методи та інформаційні технології, які використовуються в системах доповненої реальності. Встановлені основні типи доповненої реальності: на основі маркерів та безмаркерна технологія. Зроблено аналіз та порівняння характеристик найпопулярніших програмних бібліотек за допомогою яких створюють застосунки доповненої реальності. Проведено порівняльну характеристику маркерної та безмаркерної технології. Створено оптимальне поєднання інтерактивних платформ та сервісів для взаємодії між викладачами та студентами відповідно до різних спеціальностей.

У другому розділі проведено аналіз компонент та властивостей контенту, який застосовується в освітньому процесі. Виокремлено фактори впливу на формування навчального контенту. Для чіткої і структурованої оцінки важливості компонентів застосовано метод аналізу ієрархій, який дозволив визначити відносну важливість одних властивостей навчального контенту над іншими.

Для визначення пріоритетності критеріїв та обґрунтування вибору програмної платформи застосовано інтегрований підхід, що поєднує методи АНР, BWM та TOPSIS. Запропонована модель дозволяє формалізувати експертні оцінки, уточнити вагові коефіцієнти критеріїв та виконати

багатокритеріальне ранжування альтернативних AR-платформ. Отримані результати формують методичну основу інформаційної технології створення AR-навчального контенту та забезпечують обґрунтований вибір інструментів для його реалізації.

Наукова новизна представленого дослідження полягає у розроблені моделі факторів впливу на вибір платформи створення навчального контенту з використанням доповненої реальності на основі методу аналізу ієрархій, який уможливив систематизацію педагогічних, технологічних та функціональних критеріїв оцінювання AR-платформ. Також синтезовано інтегровану багатокритеріальну модель вибору платформи створення AR-контенту на основі поєднання методів багатокритеріального аналізу, що забезпечило формалізацію процесу прийняття рішень та обґрунтоване ранжування альтернативних варіантів AR-технологій.

У третьому розділі визначено основні функції AR в друкованих виданнях, особливо можливості використання в навчальних підручниках. Окреслено потенційні напрями для розвитку AR-контенту в освіті. Доповнену реальність представлено як інноваційний та ефективний інструмент оновлення та модернізації традиційних друкованих ЗМІ та переідентифікації паперового друку як рівноцінного та привілейованого партнера в сучасних засобах комунікації. Відображено структурно-функціональну модель інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності. У модулі реалізовано послідовне застосування методів АНР, ВММ та TOPSIS, що формують інтегрований алгоритм аналітичної обробки даних. Наведено алгоритм взаємодії модулів інформаційної технології створення AR-контенту, схема якого демонструє загальний принцип роботи модулів, характер інформаційних потоків між ними та механізм зворотного зв'язку для коригування результатів. Проаналізовано різноманітні сервіси з можливістю створення та використання доповненої реальності. Обрано оптимальний напрямок для створення проєкту на основі доповненої реальності, це технологія WebAR – працює у браузері смартфона або комп'ютера та дозволяє

інтерактивно візуалізувати навчальний матеріал без завантаження додаткових застосунків. Висвітлено переваги, проблеми та перспективи подальших розробок даної технології. Продемонстрована схема алгоритму поетапної роботи програми доповненої реальності. Виконано порівняння та висвітлено труднощі, які присутні під час створення проєктів для навчального контенту, а саме: використання вже наявних 3D-моделей, створення нових 3D-об'єктів, обмеження браузерів через підтримку технології WebAR, обмежена можливість використання в Android та iOS, проблеми з відтворенням складних анімацій чи зображень з високою роздільною здатністю на старіших версіях операційних систем в мобільних пристроях, складність інтеграції в навчальний процес, наявність інструкцій для даної технології, можливість створення навчальних матеріалів власноруч без допомоги розробників чи дизайнерів, обмежений функціонал наявних вебресурсів. Наведено переваги технічних характеристик WebAR перед Unity, враховуючи параметри: технологічна база, складність розробки проєкту, вимоги до процесора, оперативної пам'яті та потужності відеокарти, обсяг пам'яті на SSD або HDD, вартість та час розробки.

Науковою новизною представленого дослідження є розроблення моделі формування навчального WEBAR-контенту, яка враховує дидактичні та технологічні умови використання доповненої реальності в освітньому процесі та реалізована у вигляді прототипу WEBAR-системи, що супроводжується методичними рекомендаціями для викладачів і набором відкритих прикладів для подальших досліджень.

У четвертому розділі обрано платформу WebAR Studio для інтеграції доповненої реальності в підручник Біологія 8 клас. WebAR технологія використовує такі стандарти як WebXR, WebGL, HTML5, Javascript з допомогою яких вона доступна для більшості пристроїв. Визначено, що дана технологія легко застосовується з освітніми ресурсами як: Moodle та Google Classroom. Платформа вміщає різні типи розпізнавання об'єктів, за основу взято тип Image tracking (розпізнавання зображення) – технологія

комп'ютерного зору яка дозволяє розпізнавати 2D-зображення (маркер) прикладом слугує рисунок з підручника. Визначено критерії якості тригерних зображень та наведено приклади їх аналізу. Створено блок-схему дослідницького процесу, яка відображає етапи дослідження. Проведено порівняльний аналіз алгоритмів виявлення ключових точок (GFTT, SIFT, KAZE, ORB, FAST+BRIEF), та визначено їхню ефективність для AR систем та наведено результати експериментального тестування на зображеннях-тригерах. Створено блок-схему дослідницького процесу, які відтворюють етапи дослідження. Інтеграція 3D моделей з ліцензією Creative Commons та створені з допомогою штучного інтелекту з тригерними зображеннями підручника. Формат “.glb” обрано за основу для 3D об'єктів. Застосовано ШІ на платформі Invideo AI для створення коротких навчальних відео про схему розвитку карієсу з описом покрокової текстової інструкції. Отримано результати впровадження у двох 8 класах з анкетуванням для оцінки ефективності та якості AR навчального матеріалу.

У висновках представлено загальні отримані результати та рекомендації.

На основі виконаної роботи було досягнуто наступних вагомих результатів:

вперше:

- розроблено класифікаційну модель факторів впливу на вибір AR-платформи створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що дозволило систематизувати педагогічні, технологічні та функціональні критерії оцінювання AR-платформ;
- синтезовано багатокритеріальну модель вибору платформи створення AR-контенту, яка є результатом поєднання методів АНР, ВWM та TOPSIS, що забезпечило формалізацію процесу прийняття рішень та обґрунтоване ранжування альтернативних технологічних рішень;
- визначено структуру та типологію навчального контенту, що використовується в імерсивних технологіях, а також встановлено пріоритетність його складових за допомогою методів

багатокритеріального аналізу, що дало змогу обґрунтувати підходи до формування AR-контенту для навчальних матеріалів.

- розроблено модель формування навчального WEBAR-контенту, яка враховує дидактичні та технологічні умови використання доповненої реальності в навчальному процесі, що дало можливість здійснити реалізацію WEB AR-системи у вигляді прототипу.

Удосконалено:

- інформаційну технологію створення навчального AR-контенту шляхом використання веб-орієнтованих технологій AR.js, Three.js та HTML, що дозволило реалізувати доступне веб-середовище для інтеграції AR-об'єктів у навчальні матеріали без необхідності використання спеціалізованого обладнання чи складного програмного забезпечення.

Набули подальшого розвитку:

- методи ранжування та оцінювання факторів впливу на вибір технологій створення AR-контенту шляхом поєднання результатів багатокритеріального аналізу та експертних оцінок, що забезпечило узгодженість визначених ваг критеріїв та їх відповідність інтенсивності впливу на досліджуваний процес;
- підходи до використання технологій доповненої реальності у навчальних виданнях, зокрема у шкільних підручниках, що дозволило реалізувати інтерактивну візуалізацію навчальних об'єктів та підвищити наочність навчального матеріалу.

Практична цінність отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає у можливості використання розробленої структурно-функціональної моделі інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності для підвищення наочності та інтерактивності навчальних матеріалів.

Запропоновані методи та технологічні рішення можуть бути застосовані у сфері розроблення цифрового освітнього контенту, створення

мультимедійних навчальних матеріалів, електронних підручників та інтерактивних освітніх ресурсів. Використання технології доповненої реальності дозволяє забезпечити візуалізацію складних навчальних об'єктів, підвищити рівень зацікавленості здобувачів освіти до навчального процесу та покращити засвоєння навчального матеріалу.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в Українській академії друкарства, на кафедрі інформаційних мультимедійних технологій, у лекційних та практичних курсах дисциплін, таких як: «Технологія електронних мультимедійних видань», «Проектування електронного мультимедійного видання», «Імерсивні технології» та «Дизайн контенту».

Практична апробація результатів дослідження виконана у Ліцеї №52 Львівської міської ради, де було впроваджено елементи розробленої інформаційної технології під час викладання навчальної дисципліни «Біологія» у 8 класі. У межах дослідження було інтегровано AR-контент до розділу підручника «Травна система. Процеси метаболізму», що дозволило реалізувати візуалізацію навчальних об'єктів та забезпечити інтерактивну взаємодію учнів з навчальним матеріалом за допомогою мобільних пристроїв.

Факт практичного використання результатів дисертаційного дослідження підтверджується відповідними актами впровадження у зазначених установах та організаціях.

Ключові слова: інформаційні технології, доповнена реальність, оптимізація, AR-платформи, Python-скрипт, ШІ, контент, метод аналізу ієрархій, матриця попарних порівнянь, головний власний вектор матриці, модель, якість навчання, навчальний процес, мультимедійні технології, інформаційні системи.

ABSTRACT

Nikitin V.O. Information technology for the creation of educational content using augmented reality. – Manuscript.

The dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 126 “Information Systems and Technologies”. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2026.

The dissertation is devoted to the scientific and applied task of developing an information technology for creating educational content using augmented reality, based on the integrated application of multi-criteria analysis methods for selecting an AR platform and implementing AR content within educational publications.

Attention is focused on the growing role of digital technologies in modern education, the challenges of integrating information systems into educational processes, and the need to develop adaptive systems capable of effectively responding to the individual needs of participants in the educational process.

The practical implementation of the results of the dissertation research is the construction of a structural-functional model of information technology for the creation of educational content using augmented reality, which defines the interrelationships between the stages of AR content formation, the selection of an AR platform, and its integration into the structure of educational publications.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusions, a list of references and appendices.

The **introduction** highlights the importance of the chosen topic, which concerns the use of augmented reality for the creation of educational content. It draws attention to the growing interest in educational materials within the education sector, as well as the challenges involved in integrating augmented reality into the teaching process. The connection between this study and the research work of the Department of Multimedia Technologies is demonstrated, which is aimed at developing modern information technologies for creating digital educational content and introducing immersive technologies into the learning process. The aim of the study is formulated: to develop information technology for creating educational

content using augmented reality. The main objectives of the research are defined, and the scientific novelty of the work is substantiated, which lies in the construction of an integrated decision-making model based on multi-criteria analysis methods for selecting the optimal platform for creating AR content and its integration into the structure of educational publications. The author's personal contribution is described, covering the development of models and methodologies, as well as joint publications with the supervisor. The research results were presented at scientific and practical conferences. The structure and scope of the thesis are summarized.

The first chapter identifies the methods and information technologies used in augmented reality systems. It identifies the main types of augmented reality: marker-based and markerless technologies. An analysis and comparison of the characteristics of the most popular software libraries used to create augmented reality applications is provided. A comparative analysis of marker-based and markerless technologies is conducted. An optimal combination of interactive platforms and services for interaction between teachers and students is developed, tailored to various academic disciplines.

The second chapter analyzes the components and properties of content used in the educational process. Factors influencing the development of educational content are identified. To provide a clear and structured assessment of the importance of these components, the hierarchical analysis method was applied, which made it possible to determine the relative importance of certain properties of educational content over others. To determine the priority of criteria and justify the choice of a software platform, an integrated approach combining the AHP, BWM, and TOPSIS methods was applied. The proposed model allows for the formalization of expert assessments, the refinement of criterion weighting coefficients, and the performance of multi-criteria ranking of alternative AR platforms. The results obtained form the methodological basis for the information technology of creating AR educational content and ensure a well-founded selection of tools for its implementation.

The scientific novelty of this study lies in the developed model of factors influencing the selection of a platform for creating educational content using augmented reality based on the hierarchical analysis method, which enabled the systematization of pedagogical, technological, and functional criteria for evaluating AR platforms. An integrated multi-criteria model for selecting an AR content creation platform was also synthesized based on a combination of multi-criteria analysis methods, which ensured the formalization of the decision-making process and a well-founded ranking of alternative AR technology options.

The third chapter identifies the main functions of AR in print publications, particularly its potential applications in educational textbooks. It outlines potential directions for the development of AR content in education. Augmented reality is presented as an innovative and effective tool for updating and modernizing traditional print media and repositioning print as an equal and privileged partner in modern means of communication. A structural-functional model of information technology for creating educational content using augmented reality is presented. The module implements the sequential application of the AHP, BWM, and TOPSIS methods, which form an integrated algorithm for analytical data processing. An algorithm for the interaction of information technology modules for creating AR content is presented; its diagram demonstrates the general principle of the modules' operation, the nature of information flows between them, and the feedback mechanism for adjusting results. Various services with the capability to create and utilize augmented reality are analyzed. The most optimal direction for creating a project based on augmented reality has been selected: WebAR technology—which runs in a smartphone or computer browser and allows for the interactive visualization of educational material without downloading additional applications. The advantages, challenges, and prospects for further development of this technology are highlighted. A flowchart illustrating the step-by-step operation of the augmented reality program is presented. A comparison was performed and the difficulties encountered when creating projects for educational content were highlighted, namely: the use of existing 3D models, the creation of new 3D objects,

browser limitations due to WebAR support, limited usability on Android and iOS, problems with rendering complex animations or high-resolution images on older versions of operating systems in mobile devices, the complexity of integration into the educational process, the availability of instructions for this technology, the ability to create educational materials independently without the help of developers or designers, and the limited functionality of existing web resources. The advantages of WebAR's technical specifications over Unity are presented, taking into account the following parameters: technological base, project development complexity, requirements for the processor, RAM, and graphics card power, storage capacity on SSD or HDD, cost, and development time.

The scientific novelty of this study lies in the developed model for creating educational WebAR content, which takes into account the didactic and technological conditions for using augmented reality in the educational process and is implemented as a prototype WebAR system, accompanied by methodological recommendations for teachers and a set of open-source examples for further.

In the fourth chapter, the WebAR Studio platform was selected for integrating augmented reality into the 8th-grade biology textbook. WebAR technology utilizes standards such as WebXR, WebGL, HTML5, and JavaScript, making it accessible on most devices. It was determined that this technology integrates easily with educational platforms such as Moodle and Google Classroom. The platform supports various types of object recognition, with image tracking—a computer vision technology that allows for the recognition of 2D images (markers)—serving as the foundation; an example is an illustration from the textbook. Quality criteria for trigger images have been defined, and examples of their analysis are provided. A flowchart of the research process has been created, illustrating the stages of the study. A comparative analysis of keypoint detection algorithms (GFTT, SIFT, KAZE, ORB, FAST+BRIEF) was conducted, their effectiveness for AR systems was determined, and the results of experimental testing on trigger images are presented. A flowchart of the research process was created, illustrating the stages of the study. 3D models licensed under Creative Commons

and created using artificial intelligence were integrated with the textbook's trigger images. The ".glb" format was chosen as the basis for 3D objects. AI on the Invideo AI platform was used to create short educational videos on the progression of dental caries, accompanied by step-by-step text instructions. Results of implementation in two 8th-grade classes were obtained, including a survey to assess the effectiveness and quality of the AR educational material.

The conclusions present the overall findings and recommendations.

Based on the completed research, the following significant results were achieved:

For the first time:

- a classification model of the factors influencing the selection of an AR platform for creating educational content using augmented reality was developed, which made it possible to systematize pedagogical, technological, and functional criteria for evaluating AR platforms;
- a multicriteria model for selecting a platform for AR content creation was synthesized as a result of combining the AHP, BWM, and TOPSIS methods, which ensured the formalization of the decision-making process and the substantiated ranking of alternative technological solutions;
- the structure and typology of educational content used in immersive technologies were determined, and the priority of its components was established using multicriteria analysis methods, which made it possible to substantiate approaches to the formation of AR content for educational materials;
- a model for the formation of educational WebAR content was developed, taking into account the didactic and technological conditions for the use of augmented reality in the educational process, which enabled the implementation of a WebAR system in the form of a prototype.

Improved:

- the information technology for creating educational AR content through the use of web-oriented technologies such as AR.js, Three.js, and HTML,

which made it possible to implement an accessible web environment for integrating AR objects into educational materials without the need for specialized equipment or complex software.

Further developed:

- methods for ranking and evaluating the factors influencing the choice of AR content creation technologies through the combination of multicriteria analysis results and expert assessments, which ensured the consistency of the determined criterion weights and their correspondence to the intensity of influence on the process under study;
- approaches to the use of augmented reality technologies in educational publications, particularly in school textbooks, which made it possible to implement the interactive visualization of educational objects and increase the clarity of educational material.

The practical significance of the results obtained in the dissertation lies in the possibility of using the developed structural-functional model of the information technology for creating educational content with augmented reality to enhance the clarity and interactivity of educational materials.

The proposed methods and technological solutions can be applied in the field of digital educational content development, the creation of multimedia learning materials, electronic textbooks, and interactive educational resources. The use of augmented reality technology makes it possible to visualize complex educational objects, increase learners' interest in the educational process, and improve the assimilation of educational material.

The findings of this dissertation have been implemented at the Ukrainian Academy of Printing, in the Department of Information and Multimedia Technologies, in lecture and practical courses on subjects such as: "Technology of Electronic Multimedia Publications," "Design of Electronic Multimedia Publications," "Immersive Technologies," and "Content Design."

Practical testing of the research results was conducted at Lyceum No. 52 of the Lviv City Council, where elements of the developed information technology

were implemented during the teaching of the “Biology” course in the 8th grade. As part of the research, AR content was integrated into the textbook section “Digestive System. Metabolic Processes,” which enabled the visualization of educational objects and ensured interactive engagement of students with the educational material using mobile devices.

The practical application of the dissertation research results is confirmed by the relevant implementation certificates issued by the aforementioned institutions and organizations.

Keywords: information technology, augmented reality, optimization, AR platforms, Python script, AI, content, analytic hierarchy process method, matrix of pairwise comparisons, main eigenvector of matrix, model, quality of education, educational process, multimedia technologies, information systems.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз
даних та є науковими фаховими виданнями України:

1. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій в системах доповненої реальності. *Поліграфія і видавнича справа*. №1 (85). 2023. ст. 32-39. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-1-85-32-39.

2. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій навчання. *Комп'ютерні технології друкарства*. №2 (52). 2024. ст. 194-201. DOI: 10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-194-201

3. Нікітін В., Васюта С. Дослідження компонент цифрового навчального контенту. *Технологія і техніка друкарства*. №3 (85). 2024. ст. 101-109. DOI: 10.20535/2077-7264.3(85).2024.311476.

4. Нікітін В., Васюта С. Розробка навчальних матеріалів із застосуванням новітніх технологій. *Наукові записки*. №1 (70). 2025. ст. 213-217. DOI: 10.32403/1998-6912-2025-1-70-213-217.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Нікітін В., Васюта С. Технологія доповненої реальності в сучасному освітньому процесі/Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (06.02.-10.02. 2023р.). Львів: УАД, 2022. С.77.

6. Нікітін В., Васюта С. Дослідження використання технології доповненої реальності // Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (05.02.-9.02. 2024р.).

7. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в друкованих виданнях. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (March 7, 2025; Oxford, UK), 189–191. DOI 10.36074/logos-07.03.2025.038

8. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в навчальних підручниках. Імерсивні технології в освіті : збірник матеріалів V Міжнар.наук.-практ. конф., м. Київ, 29 квітня 2025 р. / за заг. ред. Носенко

Ю.Г. Київ : ІЦО НАПН України, 2025. 121-126 с. DOI 10.33407/lib.NAES.id/
eprint/745695

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	28
1.1. Характеристика інформаційних технологій навчання.....	28
1.2. Нові інформаційні технології навчання та можливості їх використання на навчальних заняттях.....	32
1.3. Порівняльний аналіз традиційних та імерсивних технологій навчання	36
1.4. Визначення, переваги та технології доповненої реальності в навчальному процесі.....	41
1.5. Проблеми впровадження технологій доповненої реальності у навчальний процес	42
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИБІР СИСТЕМИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ.....	48
2.1. Концепція моделі вибору платформи створення AR-контенту	48
2. 2. Формування ієрархічної моделі критеріїв на основі методу аналізу ієрархій.....	51
2.3. Оптимізація ваг критеріїв методом BWM.....	64
2.4. Ранжування альтернатив платформ доповненої реальності методом TOPSIS.....	70
Висновки до розділу 2	76
РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО КОНТЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ.....	78
3.1. Архітектура інформаційної технології створення навчального AR-контенту	78

3.2. Алгоритм взаємодії модулів інформаційної технології створення навчального AR-контенту	85
3.3. Алгоритм роботи програм доповненої реальності	87
3.4. Функції AR в друкованих виданнях, можливість використання в навчальних підручниках.....	93
Висновки до розділу 3	101
РОЗДІЛ 4. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО КОНТЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ	103
4.1. Оцінка можливостей інтеграції WebAR у навчальний процес	103
4.2. Web-AR Studio платформа для створення проєкту	105
4.2.1. Тип розпізнавання пофотографії	112
4.2.2. Аналіз алгоритмів виявлення ключових точок на зображенні	116
4.2.3. Поєднання 3D моделей з тригерами	121
4.2.4. Застосування штучного інтелекту для створення 3D моделей та навчальних відео	134
Висновок до 4 розділу	141
ВИСНОВКИ.....	144
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТОК А. ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА	158
ДОДАТОК Б. ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.....	160
ДОДАТОК В. ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ З ДОПОМОГОЮ PYTHON + OPENCV	161
ДОДАТОК Д. ПРИКЛАД GIF ФАЙЛУ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ТРИКУТНИКА.....	167
ДОДАТОК Е. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	170
ДОДАТОК Є. ДОВІДКА ВПРОВАДЖЕННЯ В ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС	171

ВСТУП

Актуальність теми. Доповнена реальність (augmented reality – AR) може допомогти зробити навчальний контент більше інтерактивним і дозволити студентам більше зосередитись на практиці, а не в теорії. З доступних досліджень встановлено, щоб в закладах освіти досліджувана технологія підвищує ефективність навчання, сприяє розвитку пізнавальної активності, підвищує якість засвоєння знань, провокує інтерес, сприяє розвитку дослідницьких навичок та предметних компетентностей здобувачів освіти. Методологія доповненої реальності передбачає створення та використання тематичного візуалізованого контенту у вигляді поєднання реальних та віртуальних об'єктів заснований на використанні сучасних мобільних інтернет-пристроїв. Одним із напрямів такого роду досліджень є міжнародний проєкт Augmented Reality in School Environments (ARiSE), основною метою якого є розробка навчальної платформи з використанням технології доповненої реальності. Застосування технології AR у навчальному процесі є предметом досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців.

Актуальними напрямками застосування технології доповненої реальності у процесі професійної підготовки майбутніх фахівців є такі: візуалізація 3D-об'єктів для наочного представлення навчального контенту; використання маркування реальних об'єктів для їх розпізнавання; використання мобільних та веб-застосунків для взаємодії віртуального об'єкта з користувачем в режимі онлайн.

Проте, недостатньо дослідженими є питання: чи зможе використання AR зробити навчальний контент більш доступним та позитивно вплинути на розуміння отриманої інформації. Застосування технології доповненої реальності має широкі перспективи використання в освіті для вирішення спеціалізованого кола завдань освітнього характеру.

Помітну роль у формуванні сучасних підходів до впровадження доповненої реальності в освіту відіграли Timothy John Pattiasina, Sandip S. Deshmukh, Sebastian Budzan та M.A.T. Figueiredo. У їхніх наукових працях

окреслено концептуальні підходи до використання AR-технологій у навчальному середовищі, розкрито можливості інтерактивної візуалізації складних об'єктів і процесів. Дослідники акцентують на потенціалі AR як засобу поглиблення розуміння навчального матеріалу, розвитку просторового мислення та посилення мотивації здобувачів освіти.

Значний внесок у розвиток теоретичних і методичних основ впровадження сучасних інформаційних технологій в освіту зробили О. С. Дущенко, Н. О. Гончарова, О. Ф. Здоровець, С. Г. Литвинова та Н. Г. Богданова. У їхніх наукових працях обґрунтовано концептуальні підходи до цифровізації освітнього середовища, розкрито моделі організації навчання з використанням інноваційних технологій, а також визначено педагогічні умови ефективної інтеграції цифрових інструментів у навчальний процес.

Вагомий внесок у формуванні теоретичних засад створення та застосування інформаційних технологій в освітній сфері зробили науковці А. С. Гордєєв, О. Г. Хамула, В. Б. Репета, І. В. Піх, І. М. Лях, Б. В. Дурняк, В. М. Сеньківський, Л. С. Сікора, Б. М. Ковальський, О. В. Тимченко та інші науковці у яких розкрито методологічні підходи, моделі та інформаційні технології спрямовані на підвищення ефективності навчального процесу, зокрема через інтеграцію технологій доповненої реальності у навчання.

Дослідження цих авторів формують важливе наукове підґрунтя для розроблення та впровадження AR-орієнтованих педагогічних рішень, що забезпечують нові можливості візуалізації, моделювання та прогностичної оцінки якості освітніх процесів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до наукових напрямів досліджень Інституту поліграфії та медійних технологій НУ «Львівська політехніка» та відповідає пріоритетним напрямам розвитку інформаційних технологій у сфері освіти.

Тематика дисертаційного дослідження узгоджується з науковими й навчально-методичними напрямами підготовки фахівців у видавничій галузі,

спрямованими на розвиток інформаційних систем та технологій створення цифрового освітнього контенту, зокрема інтерактивних та імерсивних технологій навчання.

Автором роботи розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології створення навчального AR-контенту, яка враховує дидактичні та технологічні умови використання доповненої реальності в освітньому процесі та реалізована у вигляді прототипу WEBAR-системи, що супроводжується методичними рекомендаціями для викладачів і набором відкритих прикладів для подальших досліджень.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є розроблення інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що ґрунтується на багатокритеріальному підході до вибору AR-платформи та забезпечує обґрунтоване прийняття технологічних рішень під час створення AR-освітніх матеріалів.

Для того щоб досягти поставленої мети дослідження, було визначено на виконання наступний список завдань:

- проаналізувати сучасні інформаційні технології навчання та дослідити можливості застосування імерсивних технологій в освітньому процесі;
- провести порівняльний аналіз традиційних та імерсивних технологій навчання та визначити особливості використання технологій доповненої реальності у створенні навчального контенту;
- дослідити проблеми впровадження технологій доповненої реальності у навчальний процес та визначити фактори, що впливають на вибір програмної платформи створення AR-контенту;
- сформулювати ієрархічну модель критеріїв оцінювання платформ доповненої реальності із використанням методу аналізу ієрархій (АНР);

- виконати оптимізацію вагових коефіцієнтів критеріїв методом Best–Worst (BWM) та здійснити багатокритеріальне ранжування альтернативних платформ за методом TOPSIS;
- розробити модель вибору програмної платформи створення AR-контенту.
- розробити інформаційну технологію створення навчального AR-контенту, визначити її архітектуру та алгоритм формування AR-об'єктів.
- реалізувати прототип AR-контенту та дослідити можливості використання платформ Unity та WebAR.
- здійснити практичну апробацію розробленої інформаційної технології шляхом інтеграції AR-контенту у навчальний процес.

Об'єктом дослідження є процес реалізації інформаційної технології створення навчального контенту з використанням технологій доповненої реальності в освітньому середовищі.

Предметом дослідження є методи, моделі та інформаційні технології створення навчального AR-контенту та вибору програмних засобів для його реалізації.

Методи дослідження. У дисертації застосовано: метод аналізу, синтезу та узагальнення – для дослідження сучасних інформаційних технологій навчання, імерсивних технологій та підходів до створення навчального контенту з використанням доповненої реальності; порівняльний аналіз – для дослідження відмінностей між традиційними та імерсивними технологіями навчання, а також для оцінювання можливостей різних платформ створення AR-контенту; системний підхід – для формування структури інформаційної технології створення навчального AR-контенту та визначення взаємозв'язків між її основними компонентами; метод аналізу ієрархій (АНР) – для побудови ієрархічної моделі критеріїв оцінювання платформ доповненої реальності; метод Best–Worst (BWM) – для оптимізації вагових коефіцієнтів критеріїв та підвищення узгодженості експертних оцінок; метод TOPSIS – для

багатокритеріального ранжування альтернативних платформ створення AR-контенту та визначення оптимального технологічного рішення; методи математичного моделювання – для побудови інтегрованої моделі підтримки прийняття рішень щодо вибору технологічної платформи створення AR-контенту; алгоритмічні методи – для розроблення алгоритму формування навчального AR-контенту; методи комп’ютерного моделювання та програмної реалізації – для створення прототипу системи з використанням технологій WebAR, Unity та сучасних веб-технологій; експериментальні методи – для перевірки ефективності розробленої інформаційної технології у навчальному процесі.

Наукова новизна. У дисертаційній роботі розв’язано науково-прикладне завдання щодо розроблення інформаційної технології створення та реалізації навчального контенту з використанням імерсивних технологій, зокрема доповненої реальності, шляхом розроблення інтегрованої моделі вибору платформи та реалізації AR-контенту у структурі навчальних видань.

На основі виконаних досліджень одержано такі вагомі наукові результати:

Вперше:

- розроблено класифікаційну модель факторів впливу на вибір AR-платформи створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що дозволило систематизувати педагогічні, технологічні та функціональні критерії оцінювання AR-платформ;
- синтезовано багатокритеріальну модель вибору платформи створення AR-контенту, яка є результатом поєднання методів АНР, ВWM та TOPSIS, що забезпечило формалізацію процесу прийняття рішень та обґрунтоване ранжування альтернативних технологічних рішень;
- визначено структуру та типологію навчального контенту, що використовується в імерсивних технологіях, а також встановлено пріоритетність його складових за допомогою методів

багатокритеріального аналізу, що дало змогу обґрунтувати підходи до формування AR-контенту для навчальних матеріалів.

- розроблено модель формування навчального WEBAR-контенту, яка враховує дидактичні та технологічні умови використання доповненої реальності в навчальному процесі, що дало можливість здійснити реалізацію WEB AR-системи у вигляді прототипу.

Удосконалено:

- інформаційну технологію створення навчального AR-контенту шляхом використання веб-орієнтованих технологій AR.js, Three.js та HTML, що дозволило реалізувати доступне веб-середовище для інтеграції AR-об'єктів у навчальні матеріали без необхідності використання спеціалізованого обладнання чи складного програмного забезпечення.

Набули подальшого розвитку:

- методи ранжування та оцінювання факторів впливу на вибір технологій створення AR-контенту шляхом поєднання результатів багатокритеріального аналізу та експертних оцінок, що забезпечило узгодженість визначених ваг критеріїв та їх відповідність інтенсивності впливу на досліджуваний процес;
- підходи до використання технологій доповненої реальності у навчальних виданнях, зокрема у шкільних підручниках, що дозволило реалізувати інтерактивну візуалізацію навчальних об'єктів та підвищити наочність навчального матеріалу.

Результати дисертаційної роботи використано у:

- навчальному процесі підготовки студентів спеціальності 186 Видавництво та поліграфія ОПП «Мультимедійні видавничо-поліграфічні технології» для дисциплін «Технологія електронних мультимедійних видань», «Проектування електронного мультимедійного видання» та ОПП «Технологія електронних

мультимедійних видань» дисциплін «Імерсивні технології» та «Дизайн мультимедійного контенту»;

- апробовано у навчальному процесі шляхом інтеграції AR-контенту у навчальний матеріал підручника біології для 8 класу. У межах дослідження було розроблено фрагмент навчального контенту з використанням технології доповненої реальності для одного з розділів підручника, що передбачав візуалізацію навчальних об'єктів у вигляді тривимірних моделей та інтерактивних елементів.

Дані про впровадження підтверджено відповідними документами.

Практичне значення одержаних результатів. У результаті виконання дисертаційної роботи було досягнуто значних результатів, що мають наступне практичне застосування:

- розроблено інтегрований підхід до вибору програмної платформи створення навчального AR-контенту на основі методів багатокритеріального аналізу;
- побудовано математичну модель та запропоновано алгоритм реалізації інформаційної технології;
- розроблено прикладні AR-об'єкти для навчального контенту та реалізовано їх інтеграцію у фрагмент підручника біології для 8 класу з метою перевірки ефективності використання технології доповненої реальності в освітньому процесі;
- розроблено прототип WEB AR-системи для створення навчального AR-контенту, що дозволить забезпечити візуалізацію навчальних об'єктів у вигляді тривимірних моделей та підвищити рівень залученості учнів до навчального процесу.

Особистий внесок здобувача.

У спільних публікаціях автору належить провідна роль: [32, 58, 64] – дослідження використання технології доповненої реальності в освіті; [33] – оцінка компонент навчального контенту, визначення важливості одних властивостей навчального контенту над іншими; [26, 67] – визначення

сучасного стану технологій AR та можливості використання в друкованих виданнях; [74, 79] – інтеграція технологій доповненої реальності в освітній контент.

Апробація результатів дисертації. Головні результати дисертації доповідались та обговорювались на: звітних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (Львів, 2023-2024); VIII International Scientific and Practical Conference «Theoretical and empirical scientific research: concept and trends» (March 7, 2025; Oxford UK); V Міжнародній науково-практичній конференції «Імерсивні технології в освіті» (Київ, 29 квітня 2025); XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Мультимедійні технології в освіті та інших сферах діяльності» (Київ, 12-13 листопада 2025).

Публікації. Результати проведених досліджень викладено у 8 наукових працях, 4 з яких – у фахових виданнях України; 4 публікації у матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 103 найменувань та 6 додатків. Загальний обсяг роботи – 173 сторінки. У дисертації 35 рисунків і 25 таблиць.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В СИСТЕМАХ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

1.1. Характеристика інформаційних технологій навчання

Бурхливий розвиток науки й техніки у ХХІ столітті спричинив низку фундаментальних змін у різних сферах життя людини, у тому числі й в освіті [1]. Задля ефективної організації навчального процесу під час вивчення різних дисциплін використовуються сучасні технології, які допомагають покращити процес отримання нових знань, урізноманітнити навчальний процес цікавим та захопливим матеріалом, підвищити мотивацію учнів до навчання. Особливо актуальними такі технології стають у вищій школі.

Таким чином, на сьогодні у сучасній вищій школі застосовується низка інформаційних технологій, які спрямовані на вдосконалення навчального процесу та підвищення його ефективності, на опанування усією необхідною сукупністю знань, вмінь і навичок. Заняття, створені з їх допомогою, є особливо цікавими, що дає можливість у тому числі та підвищити мотивацію студентів до навчання. З огляду на це, важливо розглянути особливості впровадження сучасних інформаційних технологій у процесі навчання у вищій школі України.

На сьогодні однією з найбільш важливих технологій навчання є інформаційні або комп'ютерні технології, використання яких зумовлюється стрімким розвитком науки і техніки, тому для ефективної підготовки майбутніх фахівців вкрай важливо використовувати сучасні інформаційні технології навчання [2].

В цілому, комп'ютерні технології навчання – це особлива система навчання, у якій основним засобом навчання виступає комп'ютер. Комп'ютерні технології навчання визначаються як системний процес збору, обробки, зберігання та трансляції інформації за допомогою обчислювальної

техніки, що реалізується в межах взаємодії викладача та студента [1, 4]. Цей інструментарій доцільно розглядати як інноваційний та альтернативний складник сучасної дидактики. Інтеграція комп'ютерних технологій в освітній простір забезпечує органічне поєднання класичних методик із новітніми цифровими засобами, що сприяє поступовій трансформації традиційних підходів відповідно до динамічних вимог і запитів сучасного інформаційного суспільства [5].

Загалом комп'ютерні технології є фундаментальним складником сучасного освітнього процесу, знаходячи застосування в декількох ключових напрямках:

- як інструментарій для розроблення дидактичних завдань;
- як засіб візуалізації навчального матеріалу;
- як функціональна база для діагностики рівня знань здобувачів освіти;
- як ефективний механізм контролю й моніторингу результативності навчання;
- Як джерело наочності тощо.

Усе це свідчить про те, що на сьогодні комп'ютерні технології посідають вагомe місце у процесі навчання. Загалом, комп'ютерні технології навчання полягають у використанні наступних технічних засобів [6]:

- Комп'ютера - цифрового пристрою, який сьогодні є одним із основних засобів навчання;
- Засобів демонстрації - проєкторів, мультимедійних дошок, телевізорів які використовуються з метою демонстрації навчальних матеріалів, створених за допомогою комп'ютера;
- Засобів для програвання аудіо - спеціальні колонки та динаміки, які використовуються з метою програвання аудіозаписів, що мають дидактичну цінність;

- Засобів введення інформації (комп'ютерної миші, клавіатури) які необхідні для здійснення маніпуляцій у процесі використання комп'ютера.

В цілому, технічні засоби, які є складовою сучасних комп'ютерних технологій навчання, є різноманітними, їх використання залежить від особливостей заняття, його спрямування, вікових особливостей студентів, а також матеріально-технічної бази навчального закладу. Можна зазначити наступні приклади застосування комп'ютерних технологій у навчальний процес [7]:

- Застосування соціальних мереж (Facebook, YouTube, Instagram, месенджерів (Messenger, WhatsApp, Viber, Telegram) та електронної пошти з метою налагодження комунікації між учасниками навчального процесу, насамперед за умов дистанційного навчання;
- Застосування хмарних сховищ з метою зберігання та передачі навчальної інформації (Google Диск, Dropbox та інші хмарні сховища);
- Застосування сайтів та блогів, як створених викладачем або навчальним закладом, так і загальновідомих, які можуть мати дидактичну цінність;
- Застосування віртуальної дошки (Padlet, Lino, ThingLink, Genial.ly тощо) у процесі дистанційного навчання для кращої організації навчальних занять;
- Використання спеціальних онлайн-додатків та веб-сервісів, за допомогою яких створюються різноманітні завдання, що можуть бути використані викладачем з різною метою на занятті;
- Використання електронних підручників як альтернативи та/або заміни паперових підручників;
- Ведення конспектів у спеціальних програмах, що сприяє кращій організації навчальних матеріалів та нотаток студентів тощо.

В цілому, дидактичні можливості застосування сучасних технологій навчання, а, отже – комп'ютерних технологій, є значними.

Окрім цього, варто зупинитись на визначенні особливостей використання деяких різновидів комп'ютерних технологій – інформаційно-комунікаційних технологій навчання та мультимедійних технологій. В цілому, інформаційно-комунікаційні технології можна вважати терміном, тотожним комп'ютерним технологіям навчання, однак дане поняття є більш загальним та охоплює процес використання уніфікованих технологій та інтеграцію телекомунікацій (телефонних ліній, бездротових з'єднань), комп'ютерів, програмного забезпечення, накопичувальних та аудіовізуальних систем, що надають можливість користувачам створювати та зберігати дані, змінювати їх, передавати ці дані іншим користувачам. Разом з тим, враховуючи те, що інформаційно-комунікаційні технології засновані на використанні комп'ютерних технологій навчання, можна вважати їх складовою комп'ютерних технологій навчання [8].

Загалом, серед переваг використання інформаційно-комунікаційних технологій навчання (ІКТ) зазначимо наступні:

1) ІКТ можуть слугувати джерелом теоретичного матеріалу для подальшого розвитку теоретичного мислення і теоретичних знань студентів, що сприятиме розширенню знань про країни та їх особливості;

2) у якості засобів ІКТ можуть бути використані спеціальні додатки і платформи, на базі яких студенти будуть проходити різного роду тестування та інші вправи, що дасть можливість закріпити раніше отриманні знання за допомогою новітніх технологій;

3) у якості ІКТ на заняттях можуть виступати мультимедійні презентації, які містять у собі наочність, яка може сприяти розвитку теоретичного мислення старших школярів, оскільки інформація на них є систематизованою та значно простішою для сприйняття.

Окрім цього, звернемо увагу на особливості мультимедійних технологій. В цілому, мультимедійні технології навчання є одним із різновидів

комп'ютерних технологій навчання, які використовуються педагогами у процесі навчання за допомогою спеціального програмного комп'ютерного забезпечення, яке у даному випадку виступає у якості засобу здійснення педагогічної діяльності. Викладач має можливість використовувати низку засобів програмного комп'ютерного забезпечення, яке є сертифікованим та має певні функції, що можуть бути корисними під час навчання. До такого програмного забезпечення варто віднести спеціальне ПЗ для створення мультимедійних презентацій, програвання відео-фрагментів, перегляду фото, прослуховування аудіо, а також спеціально створені сайти у мережі Інтернет, які можуть слугувати джерелом мультимедіа та засобом для їх демонстрації [9].

Таким чином, підкреслимо, що на сьогодні сучасні інформаційні технології є одними з основних та найбільш важливих технологій навчання, які можуть бути використані у вищій школі. Далі розглянемо приклади та можливості використання деяких з технологій.

1.2. Нові інформаційні технології навчання та можливості їх використання на навчальних заняттях

В цілому, підкреслимо, що нові інформаційні технології можуть бути використані з метою підвищення ефективності навчального процесу у сучасній вищій школі. Таким чином, розглянемо особливості використання нових інформаційних технологій на навчальних заняттях.

Перш за все, зазначимо, що серед мультимедійних технологій можуть бути використані:

Мультимедійні презентації – особлива логічно пов'язана послідовність слайдів, які об'єднані однією тематикою та загальним принципом оформлення. Із використанням мультимедійних презентацій викладач може наочно представити навчальний матеріал, зацікавивши студентів яскравим оформленням, додатковими ефектами та наочними матеріалами у вигляді

додаткових фото, картинок, схем та таблиць. Основними програмами для створення мультимедійних презентацій є Microsoft Power-Point, а також інші спеціалізовані редактори: Google Slides, Photopia, Canva тощо [10];

Відеоматеріали. Також один із найбільш важливих та поширених мультимедійних засобів навчання, який є дуже поширеним у сучасній старшій школі. Шляхом використання спеціального програмного забезпечення для демонстрації відео, а також спеціалізованих платформ, зокрема YouTube, викладач має можливість урізноманітнити заняття цікавими відеоматеріалами, які будуть корисними під час вивчення певної теми, що сприятиме кращому формуванню знань студентів.

Мультимедійні тренажери. До них ми можемо віднести спеціально створені додатки у форматі онлайн та офлайн, які викладач може використати у процесі навчання, здебільшого з метою закріплення знань та навичок студентів. До одного з таких тренажерів ми можемо віднести LearningApps – онлайн-ресурс, за допомогою якого кожен викладач має можливість створити мультимедійні вправи для студентів та використати їх на занятті [11].

Окрім цього, у вищій школі стають все більш поширеними такі освітні онлайн-платформи:

- 1) Zoom;
- 2) Google Meet;
- 3) Moodle;
- 4) Google Classroom;
- 5) На Урок;
- 6) Всеосвіта та інші.

Звернемо більш детальну увагу на досвід використання освітніх онлайн-платформ. Перш за все, слід звернути увагу на те, як саме використовується така освітня платформа, як Zoom. Загалом, вища школа зазвичай використовує платформу Zoom для онлайн-навчання. Студенти ж беруть участь в онлайн-навчанні за допомогою комп'ютера або мобільного телефону зі встановленою програмою Zoom. Перед початком навчання викладач надсилає посилання,

ідентифікатор зустрічі та пароль доступу. Унікальність цього навчання полягає в реалізації збору завдань через платформу Zoom, де студенти вільно надають символ реакції до і після навчання та можуть ставити незрозумілі питання в колонці Chatbox. Онлайн-заняття починаються після того, як викладач дає дозвіл на приєднання. Завдяки цьому на сьогодні є можливість організувати навчання у дистанційному форматі та забезпечити його ефективність [12].

Інша платформа, яка використовується для проведення занять у дистанційному форматі – це платформа Google Meet. Її можливості та функціонал є ідентичними попередній платформі. Дану платформу було створено у 2017 році у якості одного з сервісів Google, який набув найбільшого поширення під час пандемії. Платформа має зручний звичний для користувачів даними сервісами інтерфейс, проста у використанні, тож є доречним як молодшим, так більш старшим школярам. Звернемо увагу на наступні переваги даної платформи [13, 14]:

- Організація відеозустрічей, онлайн-занять зі студентами і слухачами. У зустрічі можуть одночасно брати участь до 150 користувачів.
- Заняття може тривати безперервно до 300 годин – на відміну від Zoom, де заняття може тривати не довше 40 хвилин.
- Є можливість демонстрації матеріалів на робочому столі ПК під час занять і семінарів: під час зустрічі можна надати доступ до свого екрана, щоб показати презентації або іншу інформацію на робочому столі.
- Планування занять заздалегідь та прив'язка до гугл-календаря. Синхронізація запланованих занять виконується автоматично на всіх пристроях, тому почати зустріч можна на комп'ютері, а закінчити - на іншому пристрої, наприклад, телефоні.
- Запис занять зі збереженням відео на Google Диск.
- Приєднуватися можна як через браузер, так і через додаток для Android або iOS.

Інша група платформ – платформи для організації віртуального класу та для публікації навчальних завдань і іншої важливої інформації – Google Classroom та Moodle. Їх використовують для того, щоб у форматі онлайн публікувати усі необхідні матеріали для вивчення. Окрім цього, існує можливість вести моніторинг навчальної успішності студентів, отримувати виконані навчальні завдання тощо.

Звернемо увагу на наступну платформу – НаУрок. Це освітня онлайн-платформа, створена для вітчизняної освіти, у тому числі і вищої школи. Викладачі мають можливість брати участь у різноманітних вебінарах, семінарах та тренінгах, а також проходити курси. Окрім цього, на базі даної платформи публікується чимало навчальних матеріалів. Окрім цього, зазначимо платформу Всеосвіта. Її можливості ідентичні можливостям попередньої платформи. Обидві платформи можуть бути використані викладачами під час навчального процесу як джерело корисної інформації для проведення занять, джерело для саморозвитку, а також платформа для творчого та зручного створення тестів та інтерактивних вправ.

Також слід зазначити, що для супроводу навчальних занять можуть бути використані платформи Kahoot та LearningApps. Kahoot! це цифрова навчальна платформа, яка використовує ігри у стилі вікторин, щоб допомогти студентам навчатися, роблячи інформацію цікавою у веселій формі. Хмарний сервіс працюватиме на більшості пристроїв через веб-браузер. Це означає, що він є доступним для студентів на заняттях або вдома за допомогою ноутбуків, планшетів і смартфонів [15].

LearningApps – це онлайн платформа, яка допомагає студентам активно увімкнутися у навчальну діяльність, вони з азартом виконують завдання за представленою тематикою. На даній платформі кожен викладач може створити власну вправу, яку потім можна буде використати на уроці. Окрім цього, даними вправами зможуть скористатися і інші викладачі. Загалом, на базі даного сервісу існує можливість створити власну інтерактивну вправу, а

також використовувати банк вправ, які містяться на платформі та стосуються різних навчальних дисциплін, у тому числі і інформатики [16].

Хоча для масового використання доповненої реальності в освіті на теперішній час в закладах освіти уявити трохи складно, це більш зв'язано з фінансовою складовою даної технології. В цілому можна сказати що технологія доповненої реальності в освіті знаходиться на етапі початкового розвитку, враховуючи всі перспективи розвитку необхідно як найбільше робити наукові експерименти з доповненою реальністю в вищих навчальних закладах.

1.3. Порівняльний аналіз традиційних та імерсивних технологій навчання

Як засвідчують результати досліджень М. Аксауір та Г.Аксауір, імплементація технологій доповненої реальності сприяє суттєвому підвищенню рівня когнітивної залученості та суб'єктивної задоволеності здобувачів освіти навчальним процесом. Водночас інтеграція AR-інструментарію актуалізує потребу в адаптації наявних педагогічних стратегій та зміні дидактичних моделей. Крім того, критично важливим аспектом є формування професійної компетентності науково-педагогічних працівників у сфері методики використання AR, що передбачає створення відповідного методичного забезпечення та інструктивних матеріалів [17]. В останні роки інформаційна ера принесла нові технології, такі як хмарні обчислення, хмарне сховище та Інтернет речей [18]. У роботі Billinghamurst і Duenser наголошується, що AR створює умови для багатоканального сприйняття інформації, що робить її особливо ефективною у вивченні природничих наук, географії, медицини та технічних дисциплін. Наприклад, у підручнику з біології 3D-модель людського серця може «оживати» просто на сторінці, дозволяючи користувачу взаємодіяти з нею в реальному часі. Використання AR також сприяє розвитку просторового мислення та навичок візуалізації, які є критично

важливими для технічних спеціальностей [19]. Ще одна важлива проблема — стандартизація AR-контенту. У дослідженні Ibanez і Delgado-Kloos підкреслюється потреба у формуванні спільної педагогічної та технічної основи, яка дозволила б масштабувати використання AR у навчальних матеріалах. Крім того, повноцінне впровадження технології вимагає інтеграції з LMS (Learning Management Systems), що забезпечує можливість контролю, надання зворотного зв'язку та персоналізації навчального процесу [20].

Віртуальні аудиторії, розгорнуті на базі платформ для відеоконференцій, сприяють формуванню стійкої комунікативної взаємодії між викладачем та здобувачами освіти. Вони забезпечують можливість проведення дискусій у синхронному режимі, оперативного обміну інформацією та надання конструктивного зворотного зв'язку [21]. Вибір конкретного програмного рішення визначається дидактичними завданнями, обсягом академічної групи та необхідним функціоналом. Серед найбільш поширених інструментів, що підтримують інтерактивну взаємодію в реальному часі, виокремлено такі платформи: Zoom, Microsoft Teams, Google Meet та Adobe Connect. У таблиці 1.1, проведено аналіз характеристик платформ для відеоконференцій.

Таблиця 1.1.

Характеристика платформ для відеоконференцій.

	Zoom	Microsoft Teams	Google Meet	Adobe Connect
Безпека	Шифрування AES-256	Використання сертифікатів TLS та SRTP	Шифрування і дотримання вимог IETF	Шифрування AES-256
Кількість учасників	Базова до 100 Платна до 1000	Базова до 100 Платна до 300	Базова - 100 Платна до 1000	Базова до 100 Платна до 1500
Інтеграція	Slack, Google Workspace, Microsoft 365	Microsoft 365 для корпоративного та освітнього середовища	Google Workspace (календар, документи)	LMS, Google Workspace, Microsoft Teams

Зворотний зв'язок	Опитування, функція «підняти руку», реакції	Чати, відеозаписи, опитування	Чат, функція «підняти руку», реакції	Інтерактивні запитання, дошка для нотаток
Функції для навчання	Запис, дошка для малювання, кімнати для обговорень, чати	Запис, спільне редагування документів, чати	Запис, субтитри	Віртуальні кімнати, інтерактивні таблиці, групові роботи
Ціна (за 1 місяць), тривалість конференції	Базова до 40 хв безплатно, Платна до 30 год. Від 14\$	Базова до 60 хв безплатно, Платна до 30 год. Від 4\$	Базова до 60 хв безплатно, Платна до 24 год. Від 6\$	Базова до 30 хв безплатно, Платна до 12 год. Від 15\$

У науковій літературі до вагомих переваг дистанційного формату навчання відносять підвищену гнучкість освітнього процесу, мінімізацію логістичних витрат та впровадження інноваційних стратегій залучення суб'єктів навчання [22]. Безпека передачі даних у більшості сучасних платформ забезпечується відповідністю стандартам IETF (Internet Engineering Task Force), зокрема через використання протоколів DTLS (Datagram Transport Layer Security) та SRTP (Secure Real-time Transport Protocol) [23]. Належний рівень кібербезпеки та диференційований контроль доступу є визначальними чинниками для інтеграції таких рішень у навчальний процес.

Функціональні можливості платформ дозволяють здійснювати запис лекційних занять для їхнього подальшого опрацювання. Задля забезпечення безперервного доступу викладачів і студентів до навчальних матеріалів використовуються хмарні технології, що підтримують спільне редагування та онлайн-зберігання файлів. У таблиці 1.2 представлено порівняльний аналіз таких сервісів, як Google Drive, Microsoft OneDrive та Dropbox, за визначеними критеріями:

Таблиця 1.2.

Порівняльна характеристика хмарних сховищ

	Google Drive	Microsoft OneDrive	Dropbox
Обсяг сховища	15 ГБ безплатно, 2 ТБ – від 8\$	5 ГБ – безплатно, 6 ТБ – від 6\$	2 ГБ – безплатно, 9 ТБ – від 15\$
Інтеграція з навчальними інструментами	Google Classroom/Meet/Workspace for Education	Microsoft 365/Teams/One, LMS	Microsoft Office, Slack, Zoom
Функції для навчання	Google Docs/Sheets/Slides,	Microsoft Word/Excel/PowerPoint. Microsoft Teams	Dropbox Paper, створення тек для групових проєктів
Доступність	Підтримка на усіх платформах в тому числі й на мобільних	Інтеграція з Windows, мобільні додатки	Підтримка на усіх платформах в тому числі й на мобільних

Хмарні сховища є невід’ємним компонентом сучасного освітнього процесу, забезпечуючи зручний та безпечний доступ до навчальних матеріалів. Вони сприяють інтеграції з іншими освітніми інструментами: системами управління навчанням (LMS), платформами для відеоконференцій та спільної роботи з документами. З розвитком технологій хмарних обчислень користувачі дедалі частіше обирають зберігання даних у хмарному середовищі [24], що підвищує мобільність і доступність освітнього контенту. Окрім сховищ, у навчальному процесі активно застосовуються хмарні сервіси для симуляцій та лабораторних робіт, які дають змогу створювати віртуальні лабораторії. У таких середовищах студенти можуть проводити дослідження та експерименти без потреби у фізичному обладнанні, використовуючи складні програмні засоби та моделі. Ці сервіси забезпечують доступ до потужних обчислювальних ресурсів і сприяють формуванню практичних навичок у дистанційному форматі. У таблиці 1.3 наведено порівняльну характеристику найпоширеніших хмарних сервісів для освітніх симуляцій — Labster, Google Colab, MATLAB Online та Cisco Packet Tracer.

Таблиця 1.3.

Порівняльна характеристика хмарних сервісів

	Labster	Google Colab	Matlab Online	Cisco Packet
Основні функції	Віртуальні симуляції, 3D візуалізація, інтерактивні сценарії	Виконання коду Python, обчислення з GPU	Математичні обчислення, моделювання, аналітика	Налаштування і моделювання мереж, інтерактивні сценарії
Напрямки навчання	Біологія, хімія, медицина, фізика	Комп'ютерні науки, математика	Інженерія, фізика, економіка, біологія	ІТ, мережеві технології
Доступність	Браузер, підтримка VR	Google Drive	Браузер, інтеграція з Matlab Drive	Програма для Windows та MacOS
Підтримка спільної роботи	Викладачі можуть відстежувати	Спільний доступ до файлів	Спільний доступ у групових проєктах	Спільний доступ обмежений
Оцінювання	Вбудовані тести, результати за кожен модуль	Доступ до виконаного коду та результатів	Модулі для оцінки, звіти	Показники, звіти про виконання завдань

Усі розглянуті сервіси характеризуються високим рівнем інтерактивності, наявністю вбудованих тестів і звітів, а також можливістю відстеження виконання завдань та навчального прогресу. Такі функціональні можливості сприяють підвищенню ефективності навчання та формуванню активного освітнього середовища.

Варто зазначити, що низка аспектів, які вважаються ефективними в ігрових середовищах, також реалізується у цих сервісах. Зокрема, вони включають систему цілей і прогресій, чітко визначені правила, елементи сюжетності, високу інтерактивність та постійний зворотний зв'язок, що часто супроводжується винагородою або стимулом для користувача [25]. На сьогодні створено значну кількість програмних рішень, які охоплюють широкий спектр галузей — від реклами, маркетингу та освіти до охорони

здоров'я, біотехнологій, медицини та машинобудування. Це забезпечує можливість вибору оптимального програмного продукту відповідно до специфіки завдань і потреб користувачів [26].

1.4. Визначення, переваги та технології доповненої реальності в навчальному процесі

В останні роки розвиток інформаційних технологій дозволив створити технічні і психологічні феномени сприйняття і переживань людини, які в популярній та науковій літературі отримали назву «доповненої реальності» [27].

Доповнена реальність – це інтерактивний досвід який поєднує в собі реальний світ та комп'ютерний контент, а також це швидко розвиваючі технології, ціль яких розширити фізичний простір життя людини об'єктами, створеними за допомогою цифрових пристроїв та програм. На відміну від технологій віртуальної реальності (VR), AR інтерфейси дозволяють користувачам бачити в реальному світі віртуальні об'єкти та маніпулювати ними в реальному часі. Щоб користуватись цією технологією, використовують смартфони чи планшети з камерою, а також окуляри VR. Можна визначити великий освітній потенціал технологій віртуальної реальності для навчального процесу [28, 29]. AR технології використовують середовище навколо людини і накладають графіку, звуки чи реакцію на рухи тобто віртуальні об'єкти на реальний світ. Технології AR дозволяють керувати об'єктами доповненої реальності (повертати, пересувати, змінювати в масштабі, оглядати з різних сторін) тим самим дозволяє розвивати просторове мислення [30], підвищує рівень пізнання. Віртуальна інформація синхронізується з реальним простором і часом, внаслідок цього відбувається повне поглинання в доповнену реальність і краще сприймається навчальний матеріал. З'являється можливість побачити найменші дрібниці, наприклад в архітектурі, географічних об'єктах, рельєфі, провести хімічні чи фізичні експерименти які важко відтворити в реальних умовах.

Переваги використання AR-технологій в освіті:

- легкість, портативність і низька вартість мобільних пристроїв, тобто можливість використання та навчання з будь-якого цифрового пристрою;
- лаконічність освітнього контенту;
- перехід з інформаційного навчання до інтерактивного з навчальним контентом в реальному часі;
- навчання орієнтоване на практику;
- індивідуальне навчання через те, що кожен студент має можливість використовувати свій особистий пристрій;
- розширені можливості представлення процесів в навколишньому середовищі чи моделювання нетипових освітніх завдань;
- проведення наукових дослідів та експериментів, вивчення технічних пристроїв, різних процесів і явищ без використання обладнань з лабораторій не ризикуючи своїм здоров'ям;
- підвищена мотивація студентів шляхом створення навчального середовища та повне залучення в процес;
- можливість використання у професійній перепідготовці.

Для формування компетентностей та якості навчання необхідно впроваджувати сучасні педагогічні інноваційні технології та проводити уроки, орієнтовані на компетентнісний підхід [31].

1.5. Проблеми впровадження технологій доповненої реальності у навчальний процес

Попри значний потенціал технологій доповненої реальності (Augmented Reality, AR) у сфері освіти, їх широке впровадження в навчальний процес супроводжується низкою проблем технічного, методичного, кадрового та економічного характеру. Аналіз сучасних наукових досліджень і практичного досвіду використання AR свідчить, що ефективність застосування цієї

технології залежить не лише від її функціональних можливостей, але й від умов інтеграції в освітнє середовище.

Однією з ключових перешкод впровадження AR є технічна складність реалізації відповідних рішень. Для стабільної роботи доповненої реальності необхідні сучасні мобільні пристрої або комп'ютери з достатньою обчислювальною потужністю, які підтримують технології комп'ютерного зору, обробку тривимірної графіки та роботу сенсорних систем.

До основних технічних проблем належать:

- залежність якості AR-взаємодії від продуктивності пристрою;
- необхідність стабільного інтернет-з'єднання (особливо для WebAR);
- складність розпізнавання маркерів у різних умовах освітнього середовища (освітлення, кут огляду, якість друку);
- обмеження браузерних технологій у порівнянні з десктопними AR-системами;
- високе навантаження на акумулятор мобільних пристроїв.

Зазначені фактори ускладнюють масове використання AR у закладах освіти з неоднорідним технічним забезпеченням.

Іншою важливою проблемою є відсутність усталених педагогічних методик інтеграції доповненої реальності у навчальний процес. У більшості випадків AR використовується як візуальний ефект або демонстраційний інструмент без чіткого дидактичного обґрунтування.

Основні методичні труднощі включають:

- відсутність стандартизованих моделей проєктування AR-навчального контенту;
- складність поєднання AR із традиційними навчальними матеріалами;
- необхідність адаптації навчальних сценаріїв до інтерактивного середовища;

- ризик когнітивного перевантаження студентів через надлишкову візуалізацію;
- недостатню інтеграцію AR у навчальні програми та освітні стандарти.

Таким чином, виникає потреба у розробленні інформаційної технології створення навчального контенту, що враховує педагогічні принципи та особливості сприйняття інформації.

Впровадження AR вимагає міждисциплінарних компетентностей, які поєднують педагогіку, дизайн цифрового контенту та інформаційні технології. Більшість викладачів не мають достатнього досвіду роботи з інструментами створення AR-контенту, що значно уповільнює інтеграційні процеси.

Основними кадровими проблемами є:

- недостатній рівень цифрової компетентності викладачів;
- відсутність системної підготовки педагогів до використання імерсивних технологій;
- складність освоєння спеціалізованих програмних середовищ (Unity, AR SDK);
- потреба у співпраці між педагогами, дизайнерами та програмістами.

Це зумовлює необхідність створення технологічних рішень, орієнтованих на користувачів без глибокої технічної підготовки.

Важливим стримувальним фактором є економічна складова впровадження AR-технологій. Розробка якісного AR-контенту потребує значних часових і фінансових ресурсів, включаючи створення 3D-моделей, програмування інтерактивних сценаріїв та тестування.

До економічних обмежень належать:

- висока вартість розробки індивідуального AR-контенту;
- потреба у ліцензійному програмному забезпеченні;
- витрати на технічне оснащення навчальних закладів;

– необхідність постійного оновлення цифрового контенту.

Саме тому актуальним є пошук платформ і технологій, які забезпечують оптимальне співвідношення функціональності, доступності та вартості реалізації.

Аналіз проблем впровадження доповненої реальності у навчальний процес показує, що наявні підходи не забезпечують комплексного врахування технічних, педагогічних та економічних факторів. Це зумовлює необхідність розроблення науково обґрунтованого підходу до вибору технологічної платформи створення навчального AR-контенту, що і стало передумовою формування інтегрованої моделі прийняття рішень, розглянутої у розділі 2.

Для ефективної організації освітнього процесу, потрібно обрати оптимальні поєднання платформ та хмарних сервісів, врахувати специфіку дисциплін та взаємодію між викладачами та студентами [32]. Здійснено аналіз характеристик та визначено оптимальні варіанти поєднання сервісів у рис. 1.1.

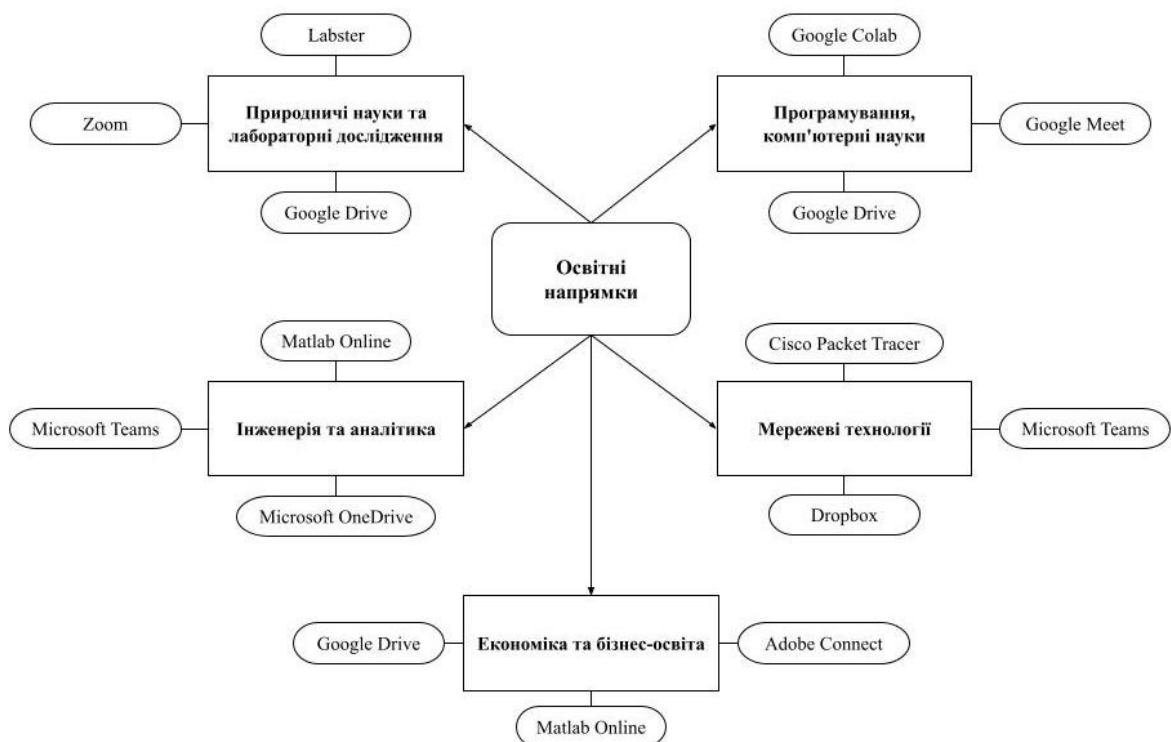


Рис. 1.1. Оптимальні варіанти поєднання онлайн сервісів

Створено поєднання для максимальної зручності й ефективності відповідно до різних спеціальностей, забезпечуючи інтеграцію навчальних

матеріалів, ефективну комунікацію, зберігання інформації, спільну роботу студентів та викладачів.

Проведений аналіз проблем впровадження доповненої реальності у навчальний процес засвідчив, що складність інтеграції AR-технологій зумовлена багатofакторністю впливу технічних, педагогічних, кадрових та економічних аспектів. Вибір платформи для створення навчального AR-контенту не може здійснюватися інтуїтивно або виключно на основі окремих технічних характеристик, оскільки ефективність її використання визначається комплексною взаємодією зазначених чинників.

Таким чином, виникає потреба у формалізації процесу прийняття рішення щодо вибору технологічної основи створення навчального AR-контенту. Такий процес має враховувати:

1. різномірність критеріїв оцінювання (технічні, педагогічні, економічні);
2. суб'єктивний характер експертних оцінок;
3. необхідність визначення пріоритетності критеріїв;
4. потребу у кількісному ранжуванні альтернатив.

Висновки до розділу 1

1. У розділі проведено системний аналіз літературних джерел який засвідчив, що сучасні інформаційні технології посідають ключове місце у трансформації освітнього процесу. Комп'ютерні мультимедійні технології формують окрему систему організації освітнього процесу, що містить: збір, зберігання та передачу інформації, розширюючи дидактичні можливості викладача та сприяючи підвищенню мотивації та залученості учнів чи студентів.

2. Імерсивні технології, серед яких доповнена реальність (AR) визначена як перспективна технологія навчання, що забезпечує інтерактивність та

можливість в реальному часі маніпулювати віртуальними об'єктами. Впровадження AR супроводжується низкою проблем: технічних та методичних, що уповільнює їхнє широке застосування, в тому числі залежність від продуктивності пристроїв, відсутність методик, висока вартість розробки контенту.

3. Зазначено, що необхідність формалізації процесу вибору AR-платформи є ключовим, особливо щодо вибору технологічної основи створення навчального AR-контенту, що безпосередньо впливає на успішність та якість навчання.

4. Під час дослідження виявлено низку проблем, що не дозволяють широко впроваджувати AR у навчальний процес: технічні обмеження (продуктивність пристроїв, якість розпізнавання маркерів, стабільність програмних середовищ для створення доповненої реальності), методичні труднощі (відсутність повністю описаних моделей проектування AR-контенту), економічні чинники (висока вартість розробки, платні підписки). Сукупність цих аспектів свідчить про багатофакторність процесу впровадження технологій доповненої реальності та необхідність системного підходу для їх використання.

5. Визначено, що доцільним є застосування методів багатокритеріального аналізу прийняття рішень, які дозволяють систематизувати критерії, визначити їх вагомість та обґрунтовано обрати оптимальну платформу. Саме тому у другому розділі дисертації запропоновано інтегрований підхід, що поєднує метод аналізу ієрархій (АНП), метод Best–Worst (BWM) та метод TOPSIS для комплексного оцінювання AR-платформ. Запропонована модель дозволяє перейти від описового аналізу проблем до формалізованого алгоритму вибору технологічного рішення, що забезпечує наукову обґрунтованість та відтворюваність результатів.

РОЗДІЛ 2.

МОДЕЛЮВАННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ВИБІР СИСТЕМИ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

2.1. Концепція моделі вибору платформи створення AR-контенту

Сучасні технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності (Augmented Reality) характеризуються наявністю великої кількості альтернативних програмних платформ, які відрізняються функціональністю, технологічними можливостями, апаратними вимогами та педагогічними характеристиками. Вибір оптимальної платформи для створення AR-контенту є складним багатокритеріальним завданням, що потребує одночасного врахування педагогічних, технологічних і функціональних факторів.

Традиційні підходи до вибору програмних інструментів здебільшого ґрунтуються на інтуїтивних оцінках або аналізі окремих технічних характеристик, що не забезпечує достатнього обґрунтування прийнятого рішення. Тому виникає потреба у формалізованих методах багатокритеріального аналізу, які дозволяють систематизувати експертні знання, кількісно оцінити важливість критеріїв та сформувані обґрунтований рейтинг альтернатив.

Для розв'язання цієї проблеми у дослідженні запропоновано інтегровану багатокритеріальну модель вибору платформи для створення навчального контенту з використанням технологій доповненої реальності.

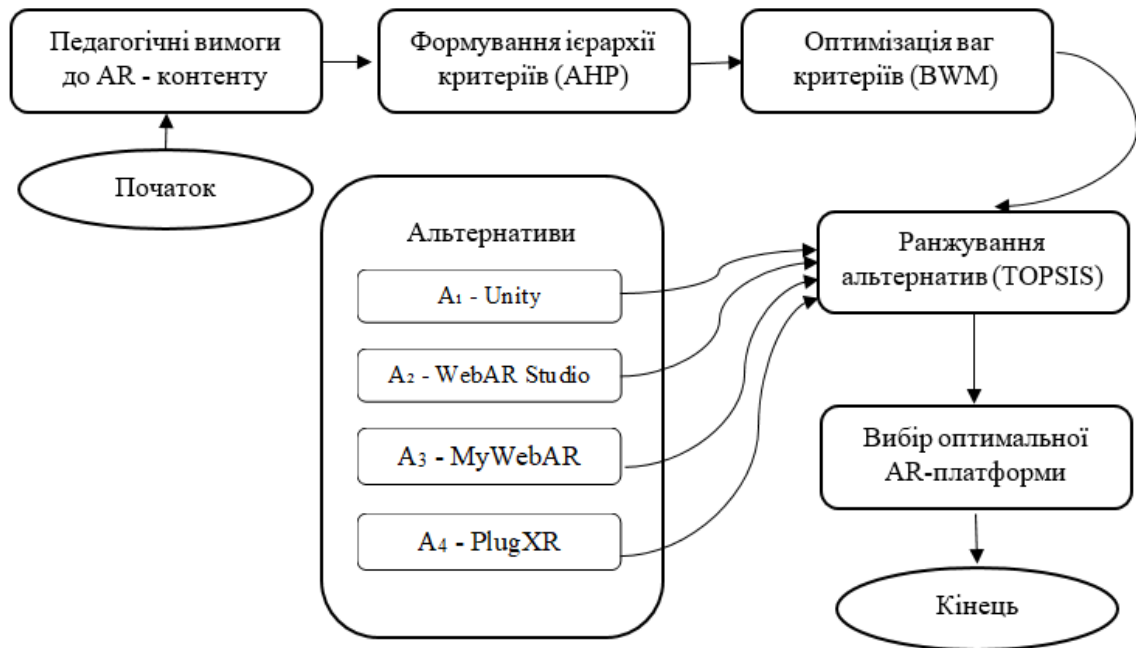


Рис. 2.1. Багатокритеріальна модель вибору платформи створення AR-контенту на основі методів АНР, BWM та TOPSIS.

Модель базується на поєднанні трьох взаємодоповнюючих методів прийняття рішень:

- АНР (Analytic Hierarchy Process) – для формування ієрархічної структури критеріїв та попереднього визначення їх пріоритетності;
- BWM (Best–Worst Method) – для оптимізації вагових коефіцієнтів критеріїв на основі мінімаксної постановки задачі;
- TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) – для багатокритеріального ранжування альтернативних платформ.

Алгоритм моделі складається з послідовних етапів структуризації критеріїв, визначення їх ваг та ранжування альтернатив. На першому етапі за допомогою методу АНР формується ієрархічна модель критеріїв та визначаються початкові вагові коефіцієнти. Далі методом BWM виконується оптимізація ваг критеріїв шляхом розв’язання min–max задачі, що дозволяє підвищити узгодженість експертних оцінок. На завершальному етапі методом TOPSIS здійснюється багатокритеріальне ранжування альтернативних

платформ за ступенем наближення до ідеального рішення, що дозволяє визначити найбільш доцільну платформу створення AR-контенту.

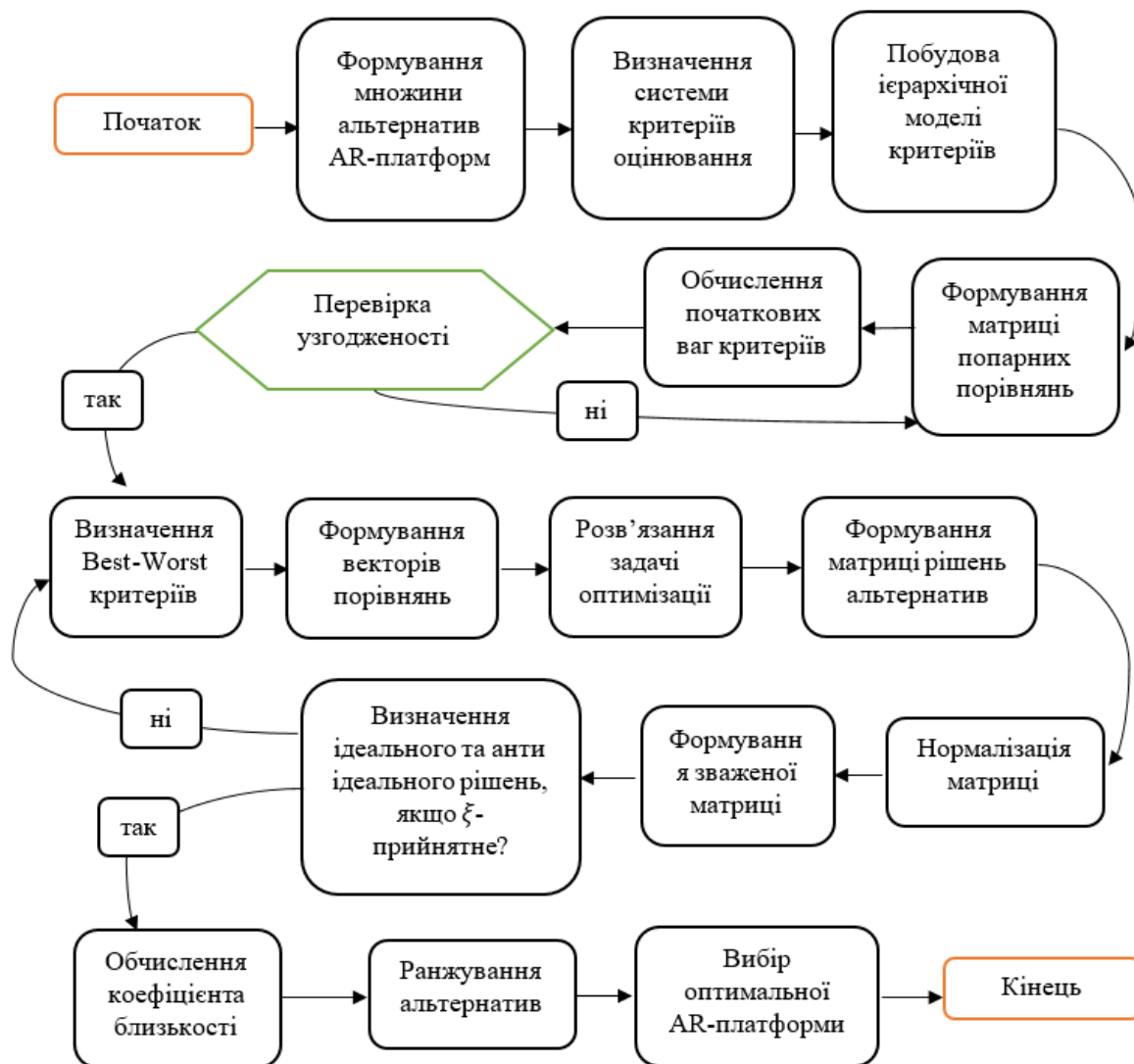


Рис. 2.2. Алгоритм багатокритеріальної моделі вибору платформи створення AR-контенту на основі методів AHP, BWM та TOPSIS.

Поєднання цих методів дозволяє реалізувати послідовний процес прийняття рішень, який включає:

- структуризацію задачі вибору та формування системи критеріїв;
- визначення вагових коефіцієнтів критеріїв на основі експертних оцінок;
- кількісне порівняння альтернативних технологічних платформ;
- обґрунтований вибір оптимальної альтернативи.

Метод АНР використовується для побудови ієрархічної моделі критеріїв оцінювання. Це дозволяє розкласти складну задачу вибору платформи на окремі структурні елементи та визначити взаємозв'язки між ними.

Метод BWM застосовується для уточнення вагових коефіцієнтів критеріїв шляхом оптимізації експертних порівнянь. Його використання дозволяє зменшити кількість необхідних оцінок і підвищити узгодженість експертних суджень.

Метод TOPSIS використовується на завершальному етапі для оцінювання альтернативних платформ створення AR-контенту шляхом визначення їх відстані до ідеального та анти ідеального рішень.

Таким чином, інтеграція цих методів формує єдину процедуру підтримки прийняття рішень, що забезпечує послідовний перехід від експертного аналізу критеріїв до кількісного вибору оптимальної технологічної альтернативи.

Концептуально модель реалізує таку логіку обробки даних: формування системи критеріїв оцінювання; визначення їх вагових коефіцієнтів; побудова матриці альтернативних рішень та ранжування альтернатив за ступенем їх наближення до ідеального рішення. Її використання дозволяє поєднати педагогічні, технічні та функціональні вимоги до AR-контенту в єдиній процедурі оцінювання та отримати обґрунтований результат вибору.

2. 2. Формування ієрархічної моделі критеріїв на основі методу аналізу ієрархій

Розроблення, проектування, застосування та поширення цифрових навчальних матеріалів є важливими чинниками формування сучасного освітнього процесу. Якісні матеріали сприяють підвищенню ефективності навчання, покращують сприйняття, розуміння та засвоєння інформації здобувачами освіти. Актуальність дослідження зумовлена потребою

створення впізнаваного й змістовного контенту, здатного підтримувати інтерес до навчання.

Креативний навчальний контент полегшує впровадження інноваційних підходів і сучасних методів викладання. У зв'язку з цим постає необхідність ґрунтовного дослідження властивостей навчального контенту та визначення значущості його складників. Для розв'язання цього завдання було обрано метод аналізу ієрархій Т. Сааті, який активно застосовується українськими науковцями для вирішення складних багатокритеріальних завдань, зокрема тих, що мають ієрархічну структуру.

Зазначена методика дає змогу декомпонувати складну проблему на простіші елементи з подальшим аналізом і порівнянням експертних оцінок за допомогою попарних зіставлень. Це забезпечує можливість обґрунтовано оцінити досліджувані критерії та компоненти. Метод попарних порівнянь дозволяє експертам визначити відносну вагомість складників і встановити їх місце в загальній ієрархії.

Автором було досліджено технології доповненої реальності в сучасному освітньому процесі та проаналізовано ринок друкованої продукції з елементами доповненої реальності.

У процесі дослідження інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності було проаналізовано складові та властивості контенту, що застосовується в освітньому процесі. Встановлено, що ефективність навчального матеріалу визначається не лише його змістом, а й структурою подання, рівнем залучення користувача, адаптивністю до потреб здобувачів освіти, якістю реалізації та особливостями сприйняття інформації.

Для об'єктивного визначення пріоритетності зазначених властивостей використано метод аналізу ієрархій Т. Сааті, що дозволяє формалізувати експертні судження шляхом попарних порівнянь критеріїв та подальшого розрахунку їх вагових коефіцієнтів.

На основі проведеного експертного оцінювання сформовано ієрархічну модель критеріїв навчального контенту, що включає п'ять ключових компонентів:

- залучення та взаємодія;
- адаптивність;
- якість;
- представлення інформації;
- тип сприйняття.

Застосування шкали Сааті та формування матриць попарних порівнянь дозволило визначити числові ваги кожного з компонентів та їх підкритеріїв, а також перевірити узгодженість експертних суджень.

Отримані результати стали основою для подальшого формування вимог до освітніх об'єктів доповненої реальності, оскільки саме ці критерії визначають якість, ефективність та педагогічну доцільність AR-контенту.

Методика, використана в дослідженні, базується на підході, апробованому в роботі [33], однак у межах подальшого дослідження в дисертаційній роботі вона адаптована для оцінювання саме освітнього контенту доповненої реальності.

Згідно з цією методикою, для обчислення числових ваг критеріїв необхідно сформувавши матрицю попарних порівнянь [34], у якій фіксуються результати експертного зіставлення критеріїв ($b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$) між собою.

$$B = (b_{ij}), (i, j = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Матриця попарних порівнянь B формується за таким правилом: якщо критерій b_i є рівнозначним за важливістю критерію b_j , то відповідному елементу матриці b_{ij} присвоюється значення 1.

За цієї умови матриця B набуває відповідної структури::

$$B = \begin{bmatrix} 1 & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ 1/b_{12} & 1 & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/b_{1n} & 1/b_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

На наступному етапі проводиться ранжування досліджуваних елементів. З цією метою кожному критерію з множини $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ призначається числовий коефіцієнт $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$, який відображає результати експертного оцінювання їхньої відносної значущості.

Значення елементів матриці розраховуються відповідно до встановленої формули:

$$B = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Під час обчислення числових ваг (W) критеріїв можливі певні розбіжності в експертних оцінках. Для визначення допустимого рівня таких відхилень аналізують i -й рядок матриці B , а саме елементи $b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, \dots, b_{in}$.

Ці показники формуються відповідно до встановленого співвідношення:

$$\frac{w_i}{w_1}, \frac{w_i}{w_2}, \dots, \frac{w_i}{w_j}, \dots, \frac{w_i}{w_n} \quad (4)$$

У результаті множення першого елемента, отриманого з рівності (4), на w_1 , другого – на w_2 отримуємо такі значення:

$$\frac{w_i}{w_1} w_1 = w_i, \frac{w_i}{w_2} w_2 = w_i, \frac{w_i}{w_j} w_j = w_i, \dots, \frac{w_i}{w_n} w_n = w_i \quad (5)$$

Унаслідок обчислення рівності (5) формується рядок однакових елементів w_i . Отже, значення w_i доцільно визначати за такою залежністю:

$$w_i = \text{середнє з } (b_{i1}w_1, b_{i2}w_2, \dots, b_{in}w_n) \quad (6)$$

Представимо рівність (6) таким чином:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} w_j, (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

Таким чином, рівність (7) репрезентує узагальнений механізм визначення числових ваг досліджуваних критеріїв. Вона враховує потенційні розбіжності в експертних судженнях, що обґрунтовується співвідношенням (5). Однак застосування лише цього підходу не забезпечує достатнього рівня точності отриманих результатів.

З огляду на це доцільно використати метод опрацювання експертних оцінок, який базується на визначенні максимального власного значення матриці B (λ_{\max}). У такому разі показник узгодженості експертних суджень розраховується за відповідною формулою:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n B_j K_j, \quad (8)$$

де $B_j = \sum_{i=1}^n b_{ij}$ $B_j = \sum_{i=1}^n b_{ij}$ – обчислюється сума елементів i -стовпця матриці B ; K_j – головний власний вектор матриці. K_j – середнє геометричне рядків матриці попарних порівнянь:

$$K_j = \frac{\sqrt[n]{(\prod_{i=1}^n b_{ij})}}{\sum_{i=1}^n (\sqrt[n]{(\prod_{j=1}^n b_{ij})})} \quad (9)$$

Рівень однорідності експертних суджень оцінюють за допомогою індексу узгодженості J_p , де n позначає кількість об'єктів (критеріїв) у матриці попарних порівнянь:

$$J_n = \lambda_{\max} - \frac{n}{n-1}. \quad (10)$$

Обчислений індекс однорідності (10) зіставляють із еталонними значеннями (табл. 2.1.), наведеними для випадкових матриць різної розмірності.

Таблиця 2.1.

Еталонні значення індексу узгодженості

Кількість об'єктів, n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Еталонне значення Індексу, J_e	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54	1,56	1,57	1,59

Про достатній рівень узгодженості експертних оцінок можна стверджувати у випадку, якщо розраховане значення відповідає умові

$$J_p \leq 0,1 J_e, \quad (11)$$

де J_e - еталонне (нормативне) значення показника узгодженості для матриці відповідного розміру.

Аналіз методичних і наукових джерел дає підстави стверджувати, що вимоги до навчального цифрового контенту визначаються насамперед освітніми цілями, типом навчання, технологічними можливостями [35] та чинними стандартами освіти.

Цифровий контент виступає інформаційним наповненням персонального сайту, блогу викладача або освітньої платформи. Він може бути представлений у різних формах: текстовій, графічній, відеоформаті, у вигляді інфографіки чи інших мультимедійних рішень.

Для ефективного створення, використання та поширення навчального цифрового контенту він має характеризуватися такими ключовими властивостями (рис. 2.3.):

«Якість» — відповідність освітнім вимогам і стандартам;

«Адаптивність» — урахування індивідуальних особливостей здобувачів освіти та забезпечення зручного доступу до матеріалів;

«Залучення та взаємодія» — стимулювання активної участі студентів і підтримання їхньої взаємодії протягом усього навчального процесу [36];

«Представлення інформації та тип сприйняття» — використання мультимедійних засобів [37], інфографіки [38] та інших візуальних інструментів для полегшення розуміння матеріалу й підвищення зацікавленості студентів.

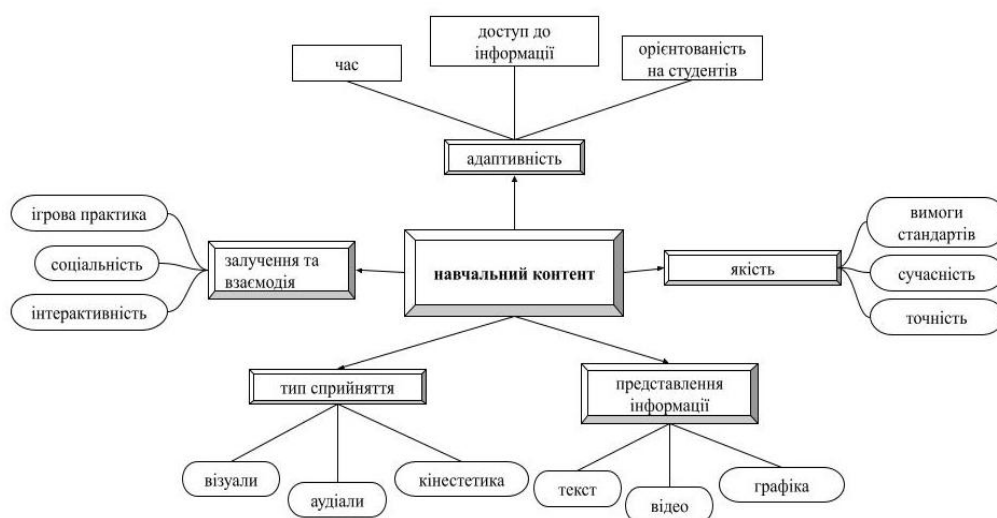


Рис. 2.3. Компоненти цифрового навчального контенту

Згідно методики викладеної вище виконаємо оцінку основних компонентів навчального цифрового контенту [39]. Сукупність компонент становить множину $i = \{1, 2, 3 \dots\}$. Для кращої наочності кожному присвоїмо номер:

k_1 – залучення та взаємодія (ЗВ);

k_2 – адаптивність (А);

k_3 – якість (Я);

k_4 – представлення інформації (ПІ);

k_5 – тип сприйняття (ТС).

Експерти, обрані з числа фахівців сфери освіти, виконали порівняння компонент за ступенем важливості. Для встановлення числової оцінки одних компонент над іншими використано шкалу порівняння за Сааті (табл. 2.2.).

Таблиця 2.2.

Шкала відносної важливості об'єктів за Сааті

Оцінка важливості	Компоненти порівняння
1	Компоненти рівноцінні
3	Один компонент дещо переважає інший
5	Один компонент переважає інший
7	Один компонент значно переважає інший
9	Один компонент абсолютно переважає інший
2,4,6,8	Компромісні проміжні значення

Під час заповнення матриці експертам пропонувалося відповісти на запитання такого типу:

«Наскільки, на Вашу думку, компонент i_1 має більший вплив на створення, використання та поширення цифрового навчального контенту порівняно з компонентом i_2 ?»

Наприклад, якщо експерти оцінювали якість як більш значущий чинник, ніж тип сприйняття інформації, першому компоненту надавалася вища оцінка

за відповідною шкалою. Подібне попарне зіставлення було здійснено для всіх ключових компонентів (табл. 3).

На основі отриманих результатів попарних порівнянь обчислено вагові коефіцієнти кожного компонента згідно з формулою (7). Отримані значення наочно відображають їхню відносну пріоритетність та ступінь впливу в загальній структурі моделі.

Сформована експертами матриця попарних порівнянь відповідно до рівності 2:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/3 & 1 \\ 3 & 1 & 1/3 & 5 & 3 \\ 5 & 3 & 1 & 5 & 5 \\ 3 & 1/5 & 1/5 & 1 & 1 \\ 1 & 1/3 & 1/5 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

За рівністю 9 обчислено вагові коефіцієнти критеріїв:

$$k_1 = (1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 1)^{1/5} = 0,31$$

$$k_2 = (3 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 3)^{1/5} = 1,35$$

$$k_3 = (5 \cdot 3 \cdot 1 \cdot 5 \cdot 5)^{1/5} = 2,63$$

$$k_4 = (3 \cdot 15 \cdot 15 \cdot 1 \cdot 1)^{1/5} = 0,49$$

$$k_5 = (1 \cdot 13 \cdot 15 \cdot 1 \cdot 1)^{1/5} = 0,42$$

$$\text{Нормалізація ваг: } \sum k_i = 5,20$$

Вагові коефіцієнти критеріїв (табл. 2.3.) визначалися методом середнього геометричного рядків матриці попарних порівнянь. Для кожного рядка матриці обчислювався добуток його елементів із подальшим знаходженням кореня ступеня, що дорівнює кількості критеріїв. Отримані значення нормувалися, що дозволило сформулювати вектор локальних ваг. Такий підхід забезпечує наближення до головного власного вектора матриці попарних порівнянь і є коректним для мультиплікативних відношень, характерних для методу аналізу ієрархій.

Таблиця 2.3.

Ваги компонентів критеріїв

Критерій	Ваги компонентів, (V_i)
k_1 (ЗВ)	0,06
k_2 (А)	0,25
k_3 (Я)	0,48
k_3 (П)	0,09
k_4 (ТС)	0,08

Після визначення вагових коефіцієнтів критеріїв необхідно перевірити узгодженість експертних суджень, оскільки матриця попарних порівнянь формується на основі суб'єктивних оцінок і може містити логічні суперечності. Рівень узгодженості експертних суджень виконано за рівняннями 10, 11:

$$\lambda_{max} = 5,2$$

$$J_e = \frac{5,2 - 5}{4} = 0,05$$

$$J_p = \frac{0,05}{1,12} = 0,045$$

$J_p < 0,1 \Rightarrow$ узгодженість прийнятна.

Отримане значення коефіцієнта узгодженості підтверджує логічну несуперечливість експертних оцінок та коректність визначених вагових коефіцієнтів. Це дозволяє використовувати сформований вектор ваг як вхідні дані для подальших етапів багатокритеріального аналізу, зокрема застосування методів BWM та TOPSIS.

Застосування наведеної методики дає змогу визначити відносну значущість окремих компонентів у сформованій ієрархічній структурі. У процесі оцінювання навчального контенту доцільно акцентувати увагу на найбільш пріоритетних елементах, оскільки саме вони забезпечують високий рівень залученості та взаємодії користувачів [40].

Кожен компонент може деталізуватися через систему підкритеріїв, зокрема таких як часові параметри, доступність інформації, рівень

інтерактивності, використання ігрових практик [41] тощо. Метод аналізу ієрархій забезпечує логічно структурований підхід до їх дослідження та кількісного оцінювання.

Для визначення значущості основних компонентів навчального контенту було побудовано матриці попарних порівнянь, що дозволяють ґрунтовно проаналізувати їхню відносну вагу. Експерти здійснили попарне зіставлення підкритеріїв (табл. 3), перелік яких наведено в таблиці 4. Такий підхід дає можливість встановити, які саме аспекти кожного компонента відіграють визначальну роль у загальній ієрархії дослідження [42]. Відповідно до описаної методики також було розраховано показники узгодженості матриць попарних порівнянь для всіх підкритеріїв, наприклад в таблиці 4 подано розрахунки для підкритерію «Якість» (табл. 2.4).

Таблиця 2.4.

Матриця попарних порівнянь підкритерію «Якість»

Якість	Вимога стандартів	Точність	Сучасність	Ваги підкритеріїв, (V _i)
Вимоги стандартів	1	5	5	0,68
Точність	1/5	1	5	0,23
Сучасність	1/5	1/5	1	0,08

Оцінка узгодженості експертних суджень, $\lambda_{\max}=3,2$

Еталонне значення, $J_e=0,58$

Індекс узгодженості, $J_n=0,01$

Підсумковий показник узгодженості експертних оцінок має прагнути до нульового значення, що свідчить про коректне визначення рівня їхньої узгодженості. Якщо ж отриманий результат перевищує допустимі межі, доцільно залучити додаткових експертів або сформувати кілька експертних груп для підвищення об'єктивності оцінювання. Важливою складовою цього процесу є проведення «мозкового штурму» щодо значущості різних аспектів цифрового навчального контенту та організація відкритого обговорення отриманих результатів.

Завершальним етапом дослідження є визначення інтегрального рангу важливості підкритеріїв у межах кожного компонента (табл. 2.5.). Розрахунок здійснювався шляхом множення вагових коефіцієнтів основних компонентів на відповідні ваги їхніх підкритеріїв.

$$R_{ij} = V_i x v_{ij}, \quad (12)$$

Наприклад, компонента «Якість» має числову вагу – 0,48. Загальний ранг по кожному підкритерію обчислюється: «Вимоги до стандартів» становить – $0,48 * 0,68 = 0,326$; «Точність» – $0,48 * 0,23 = 0,11$; «Сучасність» – $0,48 * 0,08 = 0,038$. Аналогічно виконано обчислення всіх інших компонент.

Таблиця 2.5.

Загальний ранг компонент цифрового контенту

Компонент	Підкритерій	Вага компоненти	Вага підкритерію	Загальний ранг (важливість)
Залучення та взаємодія	Ігрова практика	0,06	0,64	0,038
	Соціальність		0,22	0,013
	Інтерактивність		0,12	0,007
Адаптивність	Час	0,25	0,06	0,015
	Доступ до інформації		0,21	0,052
	Орієнтованість на студентів		0,71	0,177
Якість	Вимоги стандартів	0,48	0,68	0,326
	Точність		0,23	0,11
	Сучасність		0,08	0,038
Представлення інформації	Текст	0,09	0,66	0,059
	Графіка		0,08	0,007
	Відео		0,24	0,021
Тип сприйняття	Аудіали	0,08	0,08	0,006
	Візуали		0,66	0,052
	Кінестети		0,24	0,019

Отримані вагові коефіцієнти стали основою для формування вимог до освітніх об'єктів доповненої реальності, оскільки підкритерії з найбільшим рангом безпосередньо трансформуються у вимоги до AR-контенту: ігрова практика → гейміфіковане засвоєння, вимоги стандартів → наукова обґрунтованість AR-моделей, орієнтованість на студентів → мобільність та

доступність, текст і візуали → якість графіки та відповідність реальним об'єктам (рис. 2.4.).

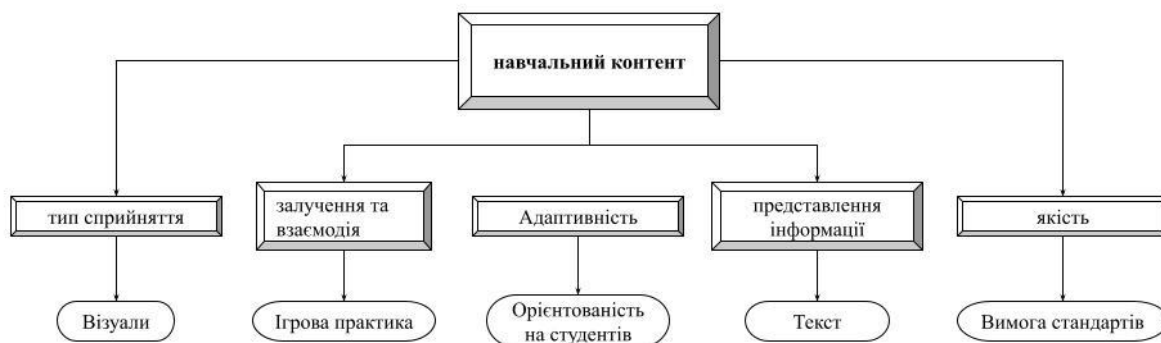


Рис. 2.4. Найважливіші компоненти цифрового навчального контенту

Отримані значення загальних рангів підкритеріїв дозволили трансформувати педагогічні вимоги до навчального контенту у конкретні технологічні вимоги до засобів доповненої реальності. Підкритерії з найбільшими вагами безпосередньо визначають ключові характеристики AR-систем: підтримку гейміфікованих сценаріїв, реалістичність тривимірних моделей, доступність на мобільних пристроях, інтуїтивність взаємодії, наявність текстових та візуальних підказок, а також можливість маніпулювання об'єктами в реальному часі (табл. 2.6.).

Таблиця 2.6.

Загальний ранг

Компонент	Підкритерій (вага)	Загальний ранг	Навчальні компетентності	Вимога до AR-технології
Залучення та взаємодія	Ігрова практика (0,64)	0,038	Мотивація через діяльність, сценарії, бали, досягнення	Підтримка гейміфікації: сценарії, тригери подій, інтерактивні завдання в AR
	Соціальність (0,22)	0,013	Спільна діяльність, обговорення	Можливість спільного перегляду/обговорення
	Інтерактивність (0,12)	0,007	Активні дії користувача	Жести, натискання, маніпуляції з 3D-об'єктами

Адаптивність	Орієнтованість на студентів (0,71)	0,177	Доступність, простота, інклюзивність	Працює на мобільних, інтуїтивний інтерфейс, без маркерів
	Доступ до інформації (0,21)	0,052	Швидке отримання матеріалу	Швидке завантаження моделей, робота без складних налаштувань
	Час (0,06)	0,015	Економія навчального часу	Миттєвий запуск AR-сцени, мінімум кроків до взаємодії
Якість	Вимоги стандартів (0,68)	0,326	Відповідність програмі, науковість	Реалістичні 3D-моделі, коректність пропорцій, перевірений контент
	Точність (0,23)	0,11	Достовірність подання	Висока деталізація графіки, коректні підписи, масштаби
	Сучасність (0,08)	0,038	Актуальні формати подання	Підтримка сучасних AR-SDK, хмарне оновлення контенту
Представлення інформації	Текст (0,66)	0,059	Пояснення, акценти	Текстові підказки, підписи в AR-сцені
	Відео (0,24)	0,021	Демонстрація процесу	Вбудовані відео/анімації в AR
	Графіка (0,08)	0,007	Візуальне доповнення	Якісні текстури, світло, тіні
Тип сприйняття	Візуали (0,66)	0,052	Основний канал сприйняття	Висока якість візуалізації, 3D-об'єкти наближені до реальних
	Кінестети (0,24)	0,019	Навчання через дію	Можливість «крутити», «збирати», взаємодіяти з моделлю
	Аудіали (0,08)	0,006	Супровід пояснення	Аудіопідказки, озвучення сцен

На цій основі сформовано алгоритм створення освітнього контенту з використанням безмаркерної доповненої реальності, який спирається на кількісно обґрунтовані показники якості, залучення, адаптивності та способів подання інформації.

Для чіткої і структурованої оцінки важливості різних компонентів було застосовано метод аналізу ієрархій. Дана методика забезпечила можливість експертного аналізу та оцінки підкритеріїв щодо основних компонент цифрового навчального контенту.

Отримані результати забезпечили детальне розуміння важливості різних аспектів цифрового навчального контенту. Встановлено узгодженість

експертних суджень. Дане дослідження сприяє до прийняття рішень, щодо підвищення ефективності та покращення цифрових навчальних матеріалів.

2.3. Оптимізація ваг критеріїв методом BWM

Метод Best–Worst Method (BWM) належить до класу методів багатокритеріального прийняття рішень (Multi-Criteria Decision Making, MCDM) [43, 44, 45]. Він був запропонований J. Rezaei у 2015 році як альтернатива традиційним попарним порівнянням у АНР з метою:

- зменшення кількості експертних оцінок;
- підвищення узгодженості суджень;
- отримання більш стабільних вагових коефіцієнтів.

На відміну від методології АНР, де експерт формує повну матрицю попарних порівнянь розміру $n \times n$, BWM потребує лише $2n-3$ оцінок. Це істотно знижує когнітивне навантаження та зменшує ризик суперечностей. Наприклад, для $n=5$ критеріїв, метод АНР потребує 10 попарних порівнянь, а BWM лише 7 оцінок. Таким чином, BWM є більш компактною та часто більш узгодженою альтернативою АНР [43].

Сформовано задачу. Нехай задано множину критеріїв: $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Необхідно визначити ваги: $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, $w_j \geq 0$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$.

Одним із ключових етапів застосування методу Best–Worst Method (BWM) є визначення еталонних критеріїв, а саме [44]:

- найважливішого критерію (Best criterion) – критерію з максимальною значущістю;
- найменш важливого критерію (Worst criterion) – критерію з мінімальною значущістю.

На відміну від методу АНР, у якому всі критерії порівнюються між собою, метод BWM спрощує процедуру оцінювання, зосереджуючись лише на

двох опорних точках найкращому та найгіршому критерії. Вони слугують еталонами для подальших порівнянь. Вибір референтних критеріїв ґрунтується на таких принципах: педагогічна релевантність критерію, яка визначає ступінь впливу на ефективність навчального процесу; вплив на результат навчання характеризує наскільки критерій впливає на засвоєння навчального матеріалу та універсальність застосування як актуальність критерію незалежно від конкретної AR-платформи; експертний консенсус характеризує узгоджену думку групи експертів.

Вибір здійснюється у два послідовні етапи:

1. Визначення найважливішого критерію

Експерт обирає критерій, який:

- має найбільший вплив на якість AR-освітнього контенту;
- визначає педагогічну ефективність технології;
- є вирішальним для досягнення освітньої мети.

В межах дослідження таким критерієм визначено C_4 – наукова валідність освітнього контенту, оскільки відповідність навчального матеріалу освітнім цілям і змісту забезпечує коректне застосування AR-технологій у навчальному процесі.

2. Визначення найменш важливого критерію.

Найменш важливим вважається критерій, який:

- має допоміжний характер;
- не визначає безпосередньо якість навчального результату;
- переважно впливає на зручність користування, а не на освітній зміст.

У дослідженні таким критерієм визначено C_5 – хмарне збереження результатів роботи, оскільки ця характеристика є технічною перевагою платформи, проте не визначає педагогічну ефективність навчального контенту.

Отже, визначення еталонних критеріїв у методі BWM дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних експертних порівнянь та підвищити

узгодженість оцінок. Обрані критерії Best і Worst виступають опорними точками багатокритеріальної моделі та забезпечують формування оптимізованого вектора ваг, який використовується на наступному етапі ранжування альтернатив методом TOPSIS.

Експерт визначає два вектори оцінок: Best-to-Others: $A_B=(a_{B1}, \dots, a_{Bn})$, де a_{Bja} показує, наскільки C_B важливіший за C_j та Others-to-Worst: $A_W=(a_{1W}, \dots, a_{nW})$, де a_{jW} показує, наскільки C_j важливіший за C_W . Саме ці два вектори використовуються для побудови оптимізаційної задачі $\min \xi$

$$\frac{w_B}{w_j} = a_{Bj}, \quad (13)$$

оскільки через експертні похибки ці рівності не виконуються точно, тому вводиться змінна ξ – максимальне відхилення, яке мінімізується [43].

Методологія задачі min–max полягає в оптимізації, у якій потрібно: знайти таке рішення, яке мінімізує найбільшу можливу помилку (або відхилення).

Тобто ми не мінімізуємо середню помилку і не суму помилок, а саме найгірший випадок. Уявімо, що експерт задав кілька співвідношень між критеріями, але вони трохи суперечливі (що нормально для людських оцінок). Оскільки ідеально виконати всі рівності неможливо, ми:

- рахуємо помилки для кожного співвідношення,
- дивимось на найбільшу помилку,
- і намагаємось зробити її якнайменшою.

Саме це і є принцип min–max: minimize (maximum error)

Нехай, w_j – шукані ваги, експерт задає співвідношення, ξ – найбільша похибка. Тоді метод BWM розв’язує: $\min \xi$

за умов:

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi, j = 1 \dots n \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1, w_j \geq 0 \quad (15)$$

Щоб отримати лінійний вигляд (придатний для LP), кожен умову з модулем розкладаємо на дві нерівності [44]:

$$1. |w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi:$$

$$w_B - a_{Bj}w_j \leq \xi$$

$$-(w_B - a_{Bj}w_j) \leq \xi \rightarrow -w_B + a_{Bj}w_j \leq \xi \quad (16)$$

$$2. |w_j - a_{jW}w_W| \leq \xi:$$

$$w_j - a_{jW}w_W \leq \xi$$

$$-(w_j - a_{jW}w_W) \leq \xi \rightarrow -w_j + a_{jW}w_W \leq \xi \quad (17)$$

Тобто: кожна різниця – це помилка, ξ – найбільша з усіх помилок, тобто ми шукаємо ваги, де ця найбільша помилка мінімальна.

Min–Max підхід означає пошук такої точки у просторі ваг, яка має найменшу максимальну відстань до всіх обмежень, заданих експертними оцінками. Алгоритм робить рішення максимально «справедливим» для всіх порівнянь одночасно.

Min–Max задача оптимізації, у якій мінімізується максимальне відхилення між заданими експертними співвідношеннями та шуканими параметрами моделі. У методі Best–Worst мінімізується параметр ξ , що характеризує найбільшу невідповідність між відносинами ваг критеріїв та експертними оцінками. Такий підхід забезпечує отримання найбільш узгодженого набору ваг у сенсі найгіршого випадку [45].

Нехай критерії (вимоги до AR-контенту) визначено такими:

C_1 – мобільна доступність

C_2 –якість графіки

C_3 – гейміфікація/інтерактивність

C_4 – наукова обґрунтованість

C_5 – хмарне збереження результатів

Best: $C_B=C_4$

Worst: $C_W=C_5$

Виконано експертами обчислення векторів з використанням шкали відносної важливості за Сааті (табл. 2.1.2.).

Best-to-Others:

$$A_B^{(1-9)} = (a_{41}, a_{42}, a_{43}, a_{44}, a_{45}) = (5, 3, 4, 1, 8)$$

Others-to-Worst:

$$A_W^{(1-9)} = (a_{15}, a_{25}, a_{35}, a_{45}, a_{55}) = (4, 5, 6, 8, 1)$$

Після розв'язання задачі отримано:

$$W^{(1-9)} = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0,1206, 0,2010, 0,1508, 0,4824, 0,0452)$$

Оптимальне відхилення становить:

$$\xi^{*(1-9)} = 0,1206$$

Отримані ваги відображають домінування наукової обґрунтованості (0.4824), далі – якість графіки (0.2010), інтерактивність (0.1508), мобільність (0.1206) та хмарне збереження (0.0452).

Для порівняння отриманих результатів виконаємо перерахунок суджень експертів за шкалою (1-5) (табл. 2.7.).

Таблиця 2.7.

Шкала важливості експертних суджень

Оцінка порівняння	Оцінка важливості
1	однакова важливість
2	слабка перевага
3	помірна перевага
4	сильна перевага
5	дуже сильна перевага

Подана шкала є простотою для експертів, несе менше когнітивне навантаження, а також має менший ризик крайніх оцінок. Проте, суттєвим недоліком є менша градація та чутливість до різниці між критеріями. Тому складніше відобразити суттєві відмінності при великій кількості критеріїв.

Отримано:

Best-to-Others:

$$A_B^{(1-5)} = (3, 2, 3, 1, 5)$$

Others-to-Worst:

$$A_W^{(1-5)} = (3, 3, 4, 5, 1)$$

Після розв'язання задачі отримано:

$$W^{(1-5)} = (0,1576, 0,2364, 0,1576, 0,3879, 0,0606)$$

Оптимальне відхилення становить:

$$\xi^{*(1-5)} = 0,08485$$

Різницю отриманих результатів подано в таблиці (2.8.).

Таблиця 2.8.

Порівняльна характеристика результатів

Критерії	Вага (1–9)	Вага (1–5)	Зміна
(C ₁) Мобільність	0.1206	0.1576	↑
(C ₂) Графіка	0.2010	0.2364	↑
(C ₃) Інтерактивність	0.1508	0.1576	≈
(C ₄) Науковість (Best)	0.4824	0.3879	↓
(C ₅) Хмара (Worst)	0.0452	0.0606	↑

З отриманих результатів можна зробити висновок, що перехід від шкали (1–9) до (1–5) зменшує доступний діапазон інтенсивностей порівняння, тому:

- знижується “контраст” між Best і Worst (домінування C₄ стає менш вираженим),
- вага найменш важливого критерію (C₅) зростає,
- середні критерії наближаються один до одного.

Це і є очікуваний ефект згладжування при використанні менш деталізованої шкали.

Розрахунок ваг методом Best–Worst виконано шляхом розв'язання задачі лінійного програмування, отриманої з мінімакс-постановки BWM через розклад модульних обмежень на систему лінійних нерівностей. Оптимізація

здійснювалась з мінімізацією параметра ξ , що відповідає максимальному відхиленню від експертних співвідношень. Отримані значення ваг w_j задовольняють умовам невід’ємності та нормування $\sum w_j = 1$.

2.4. Ранжування альтернатив платформ доповненої реальності методом TOPSIS

Після визначення вагових коефіцієнтів критеріїв за допомогою методу Best–Worst (BWM) наступним етапом дослідження є обґрунтований вибір найбільш ефективної технологічної платформи для розроблення навчального контенту з використанням технологій доповненої реальності. З цією метою було застосовано метод TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), запропонований С.-Л. Hwang та К. Yoon [46, 48].

Метод TOPSIS належить до методів багатокритеріальної підтримки прийняття рішень і ґрунтується на припущенні, що найкраща альтернатива повинна характеризуватися мінімальною відстанню до ідеального рішення. Водночас має демонструвати максимальну віддаленість від анти ідеального рішення.

Застосування методу TOPSIS у межах цього дослідження дає змогу[48]:

- виконати кількісне ранжування платформ доповненої реальності;
- врахувати ваги критеріїв, які визначені незалежно за допомогою методу BWM;
- оцінити стабільність отриманих результатів у разі зміни шкали експертних оцінок.

Для аналізу обрано досліджувані платформи, які найчастіше використовуються для створення освітнього AR-контенту:

A₁ - Unity

A₂ - WebAR Studio

A₃ - MyWebAR

A₄ - PlugXR

Оцінювання здійснюється за п'ятьма критеріями, сформованими на попередніх етапах дослідження (табл. 2.9.):

Таблиця 2.9.

Досліджувані критерії

Позначення	Критерій
C ₁	мобільна доступність
C ₂	якість графіки та 3D-візуалізації
C ₃	інтерактивність та гейміфікація
C ₄	наукова обґрунтованість
C ₅	хмарне збереження результатів

Для подальшого багатокритеріального ранжування платформ доповненої реальності за методом TOPSIS було сформовано матрицю рішень. Її елементи базуються на експертних оцінках альтернатив відповідно до визначених критеріїв.

Оцінювання здійснювалося за десятибальною шкалою (1–10), де:

1 – мінімальний рівень відповідності критерію;

5 – середній (задовільний) рівень відповідності;

10 – максимальний рівень відповідності критерію.

Шкала є інтервальною та забезпечує достатню деталізацію для диференціації альтернатив. Це має особливе значення для подальшої нормалізації даних у межах методу TOPSIS.

Використання десятибальної шкали зумовлене такими чинниками:

Простота застосування експертами.

Шкала 1–10 є інтуїтивно зрозумілою для експертів і широко використовується в освітніх та технічних дослідженнях.

Достатня глибина деталізації.

Порівняно з п'ятибальною шкалою, десятибальна дозволяє точніше відобразити відмінності між альтернативами без надмірного ускладнення процедури оцінювання.

Сумісність із методом TOPSIS.

Оскільки в методі TOPSIS застосовується векторна нормалізація, абсолютні значення шкали не впливають на коректність розрахунків; визначальним є відносне співвідношення отриманих балів.

Матриця рішень формується у вигляді [47, 48]:

$$X=[x_{ij}]$$

де x_{ij} – оцінка альтернативи A_i за критерієм C_j ; $i=1,2,\dots,m$ – кількість альтернатив; $j=1,2,\dots,n$ – кількість критеріїв.

Заповнення матриці здійснюється на основі:

- технічного аналізу можливостей AR-платформи;
- педагогічної доцільності використання;
- функціональних характеристик;
- відповідності вимогам навчального процесу.

Кожна оцінка визначається шляхом експертного узагальнення за принципом: чим повніше платформа задовольняє критерій, тим вищий бал вона отримує.

Експертна оцінка альтернатив виконана за шкалою 1–10 (табл. 2.10.).

Таблиця 2.10.

Результати оцінки альтернатив

Альтернатива	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
A_1 Unity	6	10	10	9	6
A_2 WebAR Studio	9	8	8	8	8
A_3 MyWebAR	8	7	7	8	8
A_4 PlugXR	9	7	6	6	7

Таким чином, сформована матриця рішень відображає кількісну експертну оцінку альтернативних платформ доповненої реальності за визначеною системою критеріїв та є вихідною базою для подальшого застосування методу TOPSIS.

Для перевірки стабільності результатів використано два набори ваг, отриманих методом BWM.

$$W^{(1-9)} = (0,1206, 0,2010, 0,1508, 0,4824, 0,0452)$$

$$W^{(1-5)} = (0,1576, 0,2364, 0,1576, 0,3879, 0,0606)$$

Оскільки матриця попарних порівнянь може мати різні шкали вимірювання, виконується нормалізація даних. У даному дослідженні застосовується векторна нормалізація [48]:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (18)$$

Наприклад, виконано розрахунок для альтернативи А₁ (Unity).

$$r_{11} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 9^2 + 8^2 + 9^2}} = 0,3707$$

$$r_{12} = \frac{10}{\sqrt{10^2 + 8^2 + 7^2 + 7^2}} = 0,6178$$

$$r_{13} = \frac{10}{\sqrt{10^2 + 8^2 + 7^2 + 6^2}} = 0,6337$$

$$r_{14} = \frac{9}{\sqrt{9^2 + 8^2 + 8^2 + 6^2}} = 0,5750$$

$$r_{15} = \frac{6}{\sqrt{6^2 + 8^2 + 8^2 + 7^2}} = 0,4111$$

Нормалізована матриця отримала вигляд (табл. 2.11.):

Таблиця 2.11.

Результати нормалізації альтернатив

Альтернатива	C1	C2	C3	C4	C5
A1 Unity	0,3707	0,6178	0,6337	0,5750	0,4111
A2 WebAR Studio	0,5560	0,4942	0,5070	0,5111	0,5482
A3 MyWebAR	0,4942	0,4325	0,4436	0,5111	0,5482
A4 PlugXR	0,5560	0,4325	0,3802	0,3833	0,4796

З урахуванням ваг критеріїв w_j , отриманих методом ВММ, формується зважена матриця [48]:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

Отримана матриця $V=[v_{ij}]$ відображає вплив кожного критерію на загальну оцінку альтернатив.

Наприклад для альтернативи A1 Unity:

$$v_{11}=0.1206 \cdot 0.3707=0.0447$$

$$v_{12}=0.2010 \cdot 0.6178=0.1242$$

$$v_{13}=0.1508 \cdot 0.6337=0.0956$$

$$v_{14}=0.4824 \cdot 0.5750=0.2774$$

$$v_{15}=0.0452 \cdot 0.4111=0.0186$$

Зважена нормалізована матриця (табл. 2.12.)

Таблиця 2.12.

Нормалізована матриця

Альтернатива	C1	C2	C3	C4	C5
A1 Unity	0,0447	0,1242	0,0956	0,2774	0,0186
A2 WebAR Studio	0,0671	0,0993	0,0765	0,2466	0,0248
A3 MyWebAR	0,0596	0,0869	0,0669	0,2466	0,0248
A4 PlugXR	0,0671	0,0869	0,0573	0,1849	0,0217

Обчислення відстаней до ідеальних рішень виконується для кожної альтернативи.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^+)^2} \quad (19)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - A_j^-)^2} \quad (20)$$

де S_i^+ - відстань до ідеального рішення; S_i^- - відстань до анти ідеального рішення [48].

Наприклад для

$$S_1^+ = \sqrt{(-0,02235)^2 + (-0,00619)^2} = 0,02319$$

$$S_1^- = \sqrt{(0,03725)^2 + (0,03832)^2 + (0,09246)^2} = 0,10676$$

Для кожної альтернативи обчислюється коефіцієнт відносної близькості:

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (21)$$

Значення C_i^* належить інтервалу $[0;1]$.

Чим більше значення C_i^* , тим ближча альтернатива до ідеального рішення.

Для A1 Unity:

$$C_1^* = \frac{0,10676}{0,02319 + 0,10676} = 0,8215$$

Альтернативи впорядковуються за спаданням значення C_i^* . Перше місце посідає альтернатива з найбільшим коефіцієнтом близькості.

Підсумкова таблиця 2.13. TOPSIS і ранжування.

Таблиця 2.13.

Результати ранжування

Альтернатива	S_i^+	S_i^-	C_i^*	Ранг
A1 Unity	0,02319	0,10676	0,8215	1
A2 WebAR Studio	0,04395	0,06969	0,6132	2
A3 MyWebAR	0,05670	0,06443	0,5319	3
A4 PlugXR	0,10680	0,02257	0,1744	4

Отримані значення C_i^* підтверджують, що Unity є найближчим до позитивного ідеалу та найбільш віддаленим від анти ідеалу за сукупністю критеріїв, тому посідає 1 місце. WebAR Studio має друге за величиною значення C_i^* , що забезпечує йому 2 місце у рейтингу, зберігаючи узгодженість із ваговою структурою критеріїв, де домінує критерій наукової обґрунтованості C_4 .

Метод TOPSIS дозволяє здійснити об'єктивне багатокритеріальне ранжування альтернатив з урахуванням ваг критеріїв. Його перевагами є простота реалізації, математична прозорість та можливість перевірки стійкості результатів. У даному дослідженні метод TOPSIS використано для визначення

пріоритетної платформи створення навчального контенту з використанням доповненої реальності.

Висновки до розділу 2

1. Проаналізовано компоненти та характеристики цифрового навчального контенту, що застосовується в освітньому процесі. Досліджено вимоги до структури, наочності, адаптивності та інтерактивності навчальних матеріалів у контексті використання технологій доповненої реальності. На цій основі сформовано систему критеріїв оцінювання навчального контенту та побудовано ієрархічну модель їх взаємозв'язків.
2. Сформовано інформаційну базу моделі, яка включає педагогічні вимоги до навчального контенту, технічні характеристики AR-платформ та експертні оцінки. Узагальнення цих даних дозволило визначити систему критеріїв оцінювання платформ та забезпечити формалізацію процесу прийняття рішень у межах дослідження.
3. Виконано структуризацію критеріїв оцінювання за допомогою методу АНР, що дозволило побудувати багаторівневу ієрархічну модель вибору платформи створення AR-контенту. У межах моделі встановлено взаємозв'язки між загальною метою дослідження, групами критеріїв та альтернативними платформами. Це забезпечило формалізацію експертних оцінок та створило основу для подальшого математичного аналізу критеріїв.
4. Визначено вагові коефіцієнти критеріїв шляхом оптимізації експертних порівнянь метод BWM. Це дозволило підвищити узгодженість оцінювання та зменшити кількість необхідних порівнянь. Отримані вагові коефіцієнти відображають ступінь впливу кожного критерію на процес вибору технологічної платформи створення AR-контенту.

5. Сформовано матриці рішень із застосуванням методу TOPSIS, що забезпечує багатокритеріальне ранжування альтернативних платформ створення AR-контенту на основі відстані до ідеального та анти ідеального рішень.
6. Виконано підсумкове ранжування платформ, що дозволило визначити найбільш доцільну технологію для створення навчального AR-контенту. У результаті проведеного аналізу визначено найбільш доцільну платформу для реалізації навчального AR-контенту, яка найбільш повно відповідає педагогічним вимогам, технічним характеристикам та умовам практичного використання у навчальному процесі.
7. Розроблено багатокритеріальну модель та алгоритм вибору платформи створення AR-контенту на основі методів АНР, ВММ та TOPSIS. Запропонована модель забезпечує формалізацію процесу прийняття рішень щодо вибору технологічного середовища створення AR-контенту, підвищує обґрунтованість вибору програмної платформи та створює основу для подальшої реалізації інформаційної технології формування навчальних AR-матеріалів.

РОЗДІЛ 3.

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО КОНТЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

3.1. Архітектура інформаційної технології створення навчального AR-контенту

Інформаційна технологія створення навчального контенту з використанням доповненої реальності реалізується як сукупність взаємопов'язаних функціональних модулів [49, 50]. Кожен модуль виконує певну функцію в процесі перетворення вхідних педагогічних, технологічних та експертних даних у готовий навчальний продукт. Така структуризація забезпечує керованість і відтворюваність процесу створення AR-контенту, а також дає змогу поєднати аналітичні процедури вибору технологічної платформи з практичною реалізацією навчального продукту (рис. 3.1.).

Першим елементом системи є модуль введення та збору даних призначений для отримання, первинного структурування та збереження інформації, необхідної для створення AR-освітнього контенту. На цьому етапі формується початкова інформаційна база, яка використовується на наступних стадіях аналізу, оцінювання, вибору платформи та проектування освітнього продукту.

Вхідні дані цього модуля охоплюють педагогічні вимоги до освітнього контенту, цілі навчання, характеристики цільової аудиторії, технічні вимоги до реалізації доповненої реальності, експертні оцінки, а також перелік альтернативних AR-платформ. У межах модуля інформація збирається, систематизується, попередньо класифікується та впорядковується.

Результатом роботи модуля є структурований масив вихідних даних, придатний для подальшої формалізації та аналітичного опрацювання.

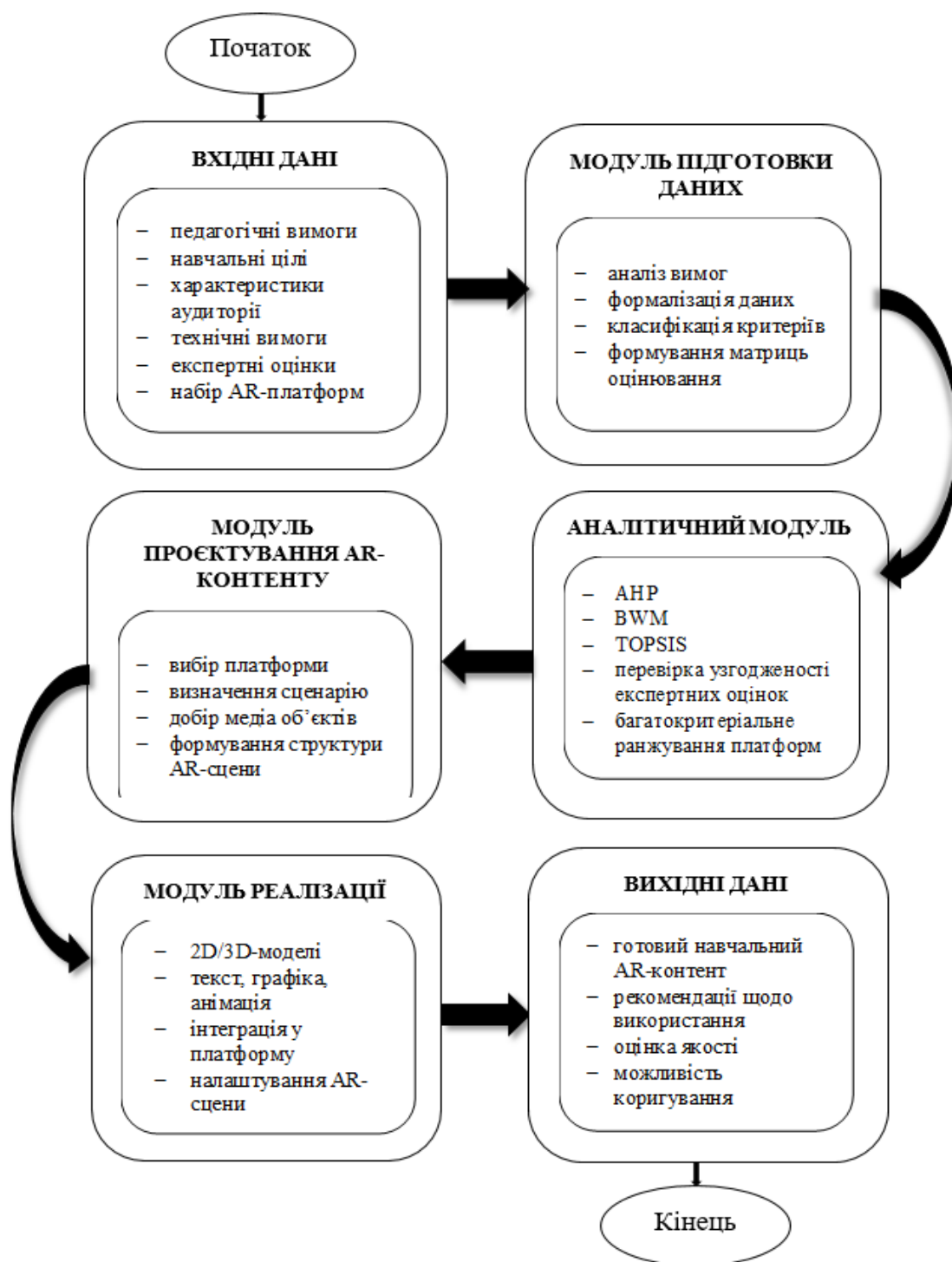


Рис. 3.1. Структурно-функціональна модель інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності

Аналітичний модуль є центральним елементом інформаційної технології створення AR-контенту для освітнього середовища, оскільки саме він реалізує інтегровану багатокритеріальну модель підтримки прийняття рішень. Метою модуля є формальне визначення структури критеріїв

оцінювання, встановлення їх пріоритетності, перевірка узгодженості експертних оцінок і ранжування альтернативних платформ для створення AR-контенту.

Вхідні дані модуля складаються із системи критеріїв і підкритеріїв, експертних оцінок, матриць попарних порівнянь та набору альтернативних AR-платформ. У модулі реалізовано послідовне застосування методів АНР, BWM і TOPSIS, які формують інтегрований алгоритм аналітичної обробки даних.

На першому етапі метод АНР формує ієрархічну структуру критеріїв і підкритеріїв. Завдяки цьому задача вибору платформи формалізується у вигляді впорядкованої системи оцінювання. Метод аналізу ієрархій дає змогу розкласти складну проблему на взаємопов'язані рівні, визначити логічні зв'язки між критеріями та сформувані початковий простір пріоритетів.

На другому етапі метод BWM уточнює вагові коефіцієнти критеріїв. Для цього визначаються найважливіший і найменш важливий критерії. Далі на основі експертних оцінок формується оптимізаційна задача, метою якої є мінімізація максимального відхилення між ваговими співвідношеннями критеріїв і заданими порівняннями. Результатом розв'язання цієї задачі є фінальний вектор ваг, який відзначається вищою узгодженістю та меншою чутливістю до суб'єктивних помилок в експертному оцінюванні.

На завершальному етапі метод TOPSIS виконує багатокритеріальне ранжування альтернативних платформ. Для цього формується матриця рішень, нормалізуються показники, визначаються ідеальне та анти ідеальне рішення. Після цього для кожної альтернативи обчислюється коефіцієнт відносної близькості до ідеального рішення. Отримані значення дають змогу впорядкувати альтернативи та вибрати платформу, яка найкраще відповідає сформованій системі критеріїв.

Формально модуль аналізу та оцінювання можна подати як модель підтримки прийняття рішень [46, 47]:

$$M = \langle A, C, E, W, R, S \rangle,$$

де:

$A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ – множина альтернативних AR-платформ;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – множина критеріїв оцінювання;

E – множина експертних оцінок;

W – кінцевий вектор ваг критеріїв, визначений методом BWM;

R – нормалізована матриця рішень;

S – підсумкове ранжування альтернатив.

У цьому поданні модуль аналізу та оцінювання набуває форми обчислювальної процедури, яка перетворює експертні знання, систему критеріїв і множину альтернатив на кількісно обґрунтоване рішення щодо вибору платформи для створення AR-освітнього контенту.

На відміну від ізольованого застосування окремих методів багатокритеріального аналізу, у запропонованому модулі методи АНР, BWM і TOPSIS є функціонально взаємопов'язаними та утворюють послідовний алгоритм обробки даних [46, 47]:

$$F_{AHP} \rightarrow F_{BWM} \rightarrow F_{TOPSIS},$$

де:

F_{AHP} – оператор формування ієрархічної структури критеріїв;

F_{BWM} – оператор оптимізації вагових коефіцієнтів критеріїв;

F_{TOPSIS} – оператор ранжування альтернатив.

Інтегровану функцію прийняття рішення тоді можна подати у вигляді:

$$S = F_{TOPSIS}(F_{BWM}(F_{AHP}(E, C), A)),$$

що відображає послідовне перетворення експертних оцінок, системи критеріїв та альтернатив у фінальний результат оцінювання платформ.

Загалом модуль аналізу та оцінювання як складову інформаційної технології можна подати так:

$$IT = \langle D, P, O \rangle,$$

де:

D – вхідні дані;

P – етапи обробки;

O – результат.

У цьому випадку етап обробки визначається композицією операторів:

$$P = F_{TOPSIS} \circ F_{BWM} \circ F_{AHP}.$$

Отже, процес вибору реалізує відображення:

$$F : (A, C, E) \rightarrow A^*,$$

де A^* - оптимальна платформа для створення AR-освітнього контенту.

Практична реалізація модуля аналізу та оцінювання передбачає послідовне виконання таких етапів: побудова ієрархічної структури критеріїв за методом АНР; визначення найкращого та найгіршого критеріїв за методом BWM; розв'язання оптимізаційної задачі та визначення фінального вектора ваг W ; формування матриці альтернативних рішень; нормалізація показників за методом TOPSIS; визначення ідеального та антиідеального рішень; обчислення коефіцієнта близькості альтернатив і їх подальше ранжування.

У межах методу TOPSIS коефіцієнт відносної близькості альтернативи до ідеального рішення визначається за формулою:

$$C_i^* = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-),$$

де S_i^+ - відстань до позитивного ідеального рішення, а S_i^- - відстань до антиідеального рішення.

Оптимальною вважається платформа, для якої значення коефіцієнта близькості є максимальним:

$$A^* = \arg \max C_i^*.$$

Таким чином, модуль аналізу та оцінювання призначений для систематизації педагогічних і технологічних вимог, встановлення пріоритетності критеріїв, перевірки узгодженості експертних оцінок і обґрунтованого вибору платформи для створення AR-освітнього контенту. Отже, він виконує роль сполучної ланки між теоретико-аналітичним рівнем дослідження, пов'язаним із розробленням системи критеріїв, і прикладним рівнем, орієнтованим на практичне створення AR-освітнього контенту.

Модуль проєктування AR-контенту призначений для перенесення результатів модуля аналізу та оцінювання у практичну площину формування

структури майбутнього освітнього продукту. Його основна функція полягає в трансформації результатів вибору технологічної платформи, педагогічних вимог і критеріїв якості у модель AR-освітнього контенту, придатну для подальшої реалізації.

Вхідні дані модуля охоплюють обрану AR-платформу, результати багатокритеріального ранжування, систему критеріїв і підкритеріїв, педагогічні вимоги до навчального матеріалу, характеристики цільової аудиторії, а також наявні освітні й мультимедійні ресурси. На основі цих даних у межах модуля розробляється концепція майбутнього AR-продукту, яка враховує як дидактичні цілі, так і технологічні можливості обраного середовища.

У процесі роботи модуля визначається сценарій використання AR-контенту в освітньому процесі, обираються типи медіа, формується структура AR-сцени та задається логіка взаємодії користувача з навчальним матеріалом. Особлива увага при цьому приділяється узгодженню змісту з його візуальною та інтерактивною реалізацією. Це дає змогу забезпечити відповідність між освітніми цілями, формою подання інформації та технологічними засобами доповненої реальності.

У функціональному аспекті модуль проєктування AR-контенту можна подати як процедуру формування дизайнерської моделі освітнього продукту:

$$P_{AR} = \langle Sc, M, I, V, T \rangle,$$

де:

Sc – сценарій використання AR-контенту;

M – множина медіа об'єктів;

I – модель інтерактивної взаємодії;

V – структура візуального подання;

T – технологічні параметри реалізації на обраній платформі.

У такому поданні модуль проєктування виконує функцію перетворення результатів аналітичного вибору платформи у структуровану специфікацію

майбутнього AR-контенту. Загалом цю процедуру можна описати як відображення:

$$G : (A^*, C, Q, L) \rightarrow P_{AR},$$

де:

A^* - обрана AR-платформа;

C – система критеріїв і вимог;

Q – сукупність навчальних матеріалів;

L – характеристики цільової аудиторії;

P_{AR} – проектна модель AR-контенту.

Отже, модуль проектування виступає сполучною ланкою між аналітичним вибором технологічного середовища та практичною реалізацією контенту. У межах цього модуля результати багатокритеріального аналізу набувають прикладного значення і трансформуються у конкретні дизайнерські рішення щодо структури, змісту та функціонування AR-освітнього продукту.

Модуль реалізації забезпечує практичне створення AR-навчального контенту на основі розробленої специфікації та обраної платформи. Його метою є перетворення концептуальної моделі навчального продукту на програмно реалізований AR-об'єкт, придатний для використання в навчальному процесі.

Вхідними даними модуля є специфікація AR-контенту, мультимедійні матеріали, технічні параметри платформи та сценарій взаємодії користувача з контентом. У межах модуля створюються двовимірні та тривимірні моделі, інтегруються тексти, графіка, анімації, аудіо- та відеоелементи, реалізуються інтерактивні компоненти, контент вбудовується в AR-платформу та налаштовуються параметри AR-сцени.

Результатом роботи модуля є готовий навчальний AR-контент, який може безпосередньо використовуватися, а також проходити тестування, оцінювання та подальше впровадження в освітній процес.

Модуль вихідних даних призначений для фіксації, подання та інтерпретації кінцевих результатів інформаційної технології створення AR-

освітнього контенту. У межах цього модуля узагальнюються результати аналітичного вибору платформи, практичної реалізації контенту та його оцінювання.

Вхідними даними модуля є результати роботи аналітичного модуля, готовий AR-освітній продукт, а також результати тестування та оцінювання якості. У межах модуля формується підсумковий набір вихідних даних, який охоплює готовий AR-освітній контент, рекомендації щодо його використання в освітньому процесі, результати оцінювання якості, а також можливі напрями коригування та вдосконалення продукту.

Результатом роботи модуля є готовий освітній продукт із супровідною інформацією, необхідною для подальшого впровадження, оцінювання ефективності та адаптації до конкретних умов навчання.

Функціонування зазначених модулів забезпечує послідовний перехід від збору та формалізації вихідної інформації до вибору технологічної платформи, проектування, реалізації та оцінювання AR-освітнього контенту. Така модульна організація інформаційної технології створює основу для структурованого, керованого та науково обґрунтованого процесу розроблення освітнього продукту з використанням технологій доповненої реальності.

3.2. Алгоритм взаємодії модулів інформаційної технології створення навчального AR-контенту

Схема взаємодії модулів інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності (AR) відображає послідовність обміну даними між основними функціональними компонентами системи (рис.3.2.) та ілюструє логіку перетворення вихідної інформації на готовий навчальний продукт [50].

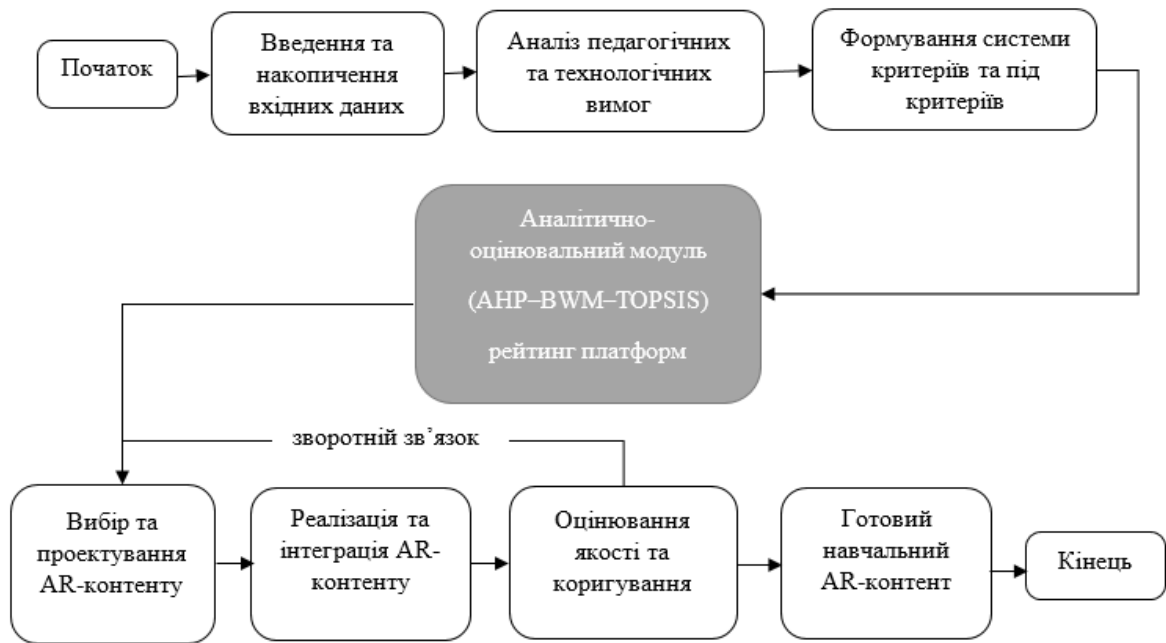


Рис. 3.2. Алгоритм взаємодії модулів інформаційної технології створення AR-контенту

Ця схема демонструє не лише загальний принцип роботи модулів, а й характер інформаційних потоків між ними, а також механізм зворотного зв'язку для коригування результатів.

На першому етапі функціонує модуль введення та накопичення даних. У ньому здійснюється збір і впорядкування педагогічних вимог, цілей навчання, характеристик цільової аудиторії, технічних вимог, експертних оцінок і переліку альтернативних AR-платформ. Сформована вхідна інформація передається до модуля підготовки даних, де виконуються аналіз вимог, формалізація даних, класифікація критеріїв та побудова оціночних матриць.

Підготовлені дані надходять до аналітичного модуля, який є центральним елементом взаємодії системи. У цьому модулі реалізуються методи АНР, ВWM і TOPSIS. Вони забезпечують структурування критеріїв, визначення їх вагових коефіцієнтів, перевірку узгодженості експертних оцінок і багатокритеріальне ранжування альтернативних платформ. Завдяки цьому

ухвалюється обґрунтоване рішення щодо вибору найбільш придатної платформи для створення AR-навчального контенту.

Результати роботи аналітичного модуля передаються до модуля проєктування AR-контенту. Тут розробляється навчальний сценарій, добираються медіаоб'єкти, визначається структура AR-сцени та логіка взаємодії користувача з контентом. Створена специфікація майбутнього продукту надходить до модуля реалізації, у якому створюються 2D- і 3D-моделі, інтегруються текстові, графічні й анімаційні елементи, а також налаштовуються параметри AR-середовища на обраній платформі.

Створений AR-продукт передається до модуля вихідних даних. У ньому формуються підсумкові результати функціонування інформаційної технології. До таких результатів належать готовий AR-навчальний контент, рекомендації щодо його використання, оцінювання якості та можливості подальшого коригування. Саме на цьому етапі реалізується механізм зворотного зв'язку: результати оцінювання можуть бути використані для повернення до модуля проєктування AR-контенту з метою уточнення структури продукту, коригування сценарію або вдосконалення окремих компонентів.

Отже, схема взаємодії модулів інформаційної технології створення AR-навчального контенту наочно демонструє послідовний і водночас ітераційний характер функціонування системи. Вона показує, як педагогічні, технологічні та експертні дані послідовно опрацьовуються та перетворюються на готовий навчальний продукт. Крім того, схема підкреслює, що результати оцінювання можуть бути використані для безперервного вдосконалення контенту. Такий підхід забезпечує цілісність, керованість і адаптивність інформаційної технології.

3.3. Алгоритм роботи програм доповненої реальності

Технології AR дозволяють керувати об'єктами доповненої реальності (повертати, пересувати, змінювати в масштабі, оглядати з різних сторін) тим самим дозволяє розвивати просторове мислення, підвищує рівень пізнання. Віртуальна інформація синхронізується з реальним простором і часом,

внаслідок цього відбувається повне поглинання в доповнену реальність і краще сприймається навчальний матеріал. З'являється можливість побачити найменші дрібниці, наприклад в архітектурі, географічних об'єктах, рельєфі, провести хімічні чи фізичні експерименти які важко відтворити в реальних умовах.

Переваги використання AR-технологій в освіті: легкість, портативність і низька вартість мобільних пристроїв, тобто можливість використання та навчання з будь-якого цифрового пристрою; лаконічність освітнього контенту; перехід з інформаційного навчання до інтерактивного з навчальним контентом в реальному часі; навчання орієнтоване на практику; індивідуальне навчання тому, що кожен студент має можливість використовувати свій особистий пристрій; розширені можливості представлення процесів в навколишньому середовищі чи моделювання нетипових освітніх завдань; проведення наукових дослідів та експериментів, вивчення технічних пристроїв, різних процесів і явищ без використання обладнань з лабораторій не ризикуючи своїм здоров'ям; підвищена мотивація студентів шляхом створення навчального середовища та повне залучення в процес [51]; можливість використання у професійній перепідготовці.

Структура яка служить для моделювання чи візуалізації складних процесів, складається з декількох основних модулів: модуль відстежування камери; модуль зберігання об'єктів; модуль користувацького інтерфейсу; модуль візуалізації. Відеопотік з камери пристрою передається в модуль відстежування камери. Модуль обробляє кожен кадр, виконує пошук заданого маркера, визначає позицію маркера в просторі та на основі цих даних визначає положення віртуальної камери відносно маркеру. Коли орієнтація і позиція камери є визначені, модуль зберігання об'єктів подає необхідний для візуалізації об'єкт на екран, використовуючи заздалегідь визначені параметри положення, масштабу та повороту. Кінцевий користувач може впливати на параметри моделі і візуалізації за допомогою користувацького інтерфейсу. В основі будь-яких програм доповненої реальності, що використовує аналіз

отриманого зображення з камери, є система комп'ютерного бачення. OpenCV [52] це найпопулярніша у світі бібліотека з відкритим кодом для комп'ютерного зору, обробки відео та зображень, що містить близько 2500 оптимізованих алгоритмів, бібліотека дозволяє розпізнавати об'єкти, аналізувати рухи, можливості машинного навчання та виявляти ознаки на подібні того як це робить звичайна людина. Але для програм доповненої реальності потрібно швидко і якісно знайти в кадрі обмежений набір завчасно відомих об'єктів та відобразити віртуальний об'єкт, в такому випадку для цієї задачі можна виділити такі бібліотеки доповненої реальності як: 1) Vuforia [53] (розроблена компанією Qualcomm) – підтримувані платформи це UWP (Windows 10/11, HoloLens), Unity; 2) ARToolKit [54] (розроблена - University of Washington HIT Lab) підтримувані платформи: iOS, Android, Windows, Linux, macOS, Unity; 3) Wikitude [55] (розроблений в Wikitude GmbH), підтримувані платформи: iOS, Android, Windows; 4) LayAR [56] (створена компанією Layar B.V.) підтримувані платформи: iOS, Android; Kudan [57] (розроблена Kudan Limited), підтримувані платформи: iOS, Unity, Android, Linux.

На рис. 3.3, алгоритм роботи діє наступним чином: з самого початку перед роботою додатка камера пристрою ініціалізується, наступним кроком камера отримує відеопотік і для подальшої роботи фіксує кадр з цього потоку та працює відповідно вже з ним, далі програма виділила кадр та наступним кроком є пошук маркеру, у випадку як тільки маркер буде знайдений то наступним йде ідентифікація, якщо результат негативний, то програма робить новий кадр, у випадку коли не вдалось зробити ідентифікацію маркеру то програма повернеться до алгоритму де отримується кадр з відео. При умові коли ідентифікація маркеру є позитивною, виконується розрахунок матриці перетворення основною роботою якої є розташування віртуальної камери та перетворення віртуальних об'єктів, потім утворюється візуалізація цих об'єктів на відеопотоці, перед тим як програма завершить свою роботу, то обробляється інформація яку ввів користувач.

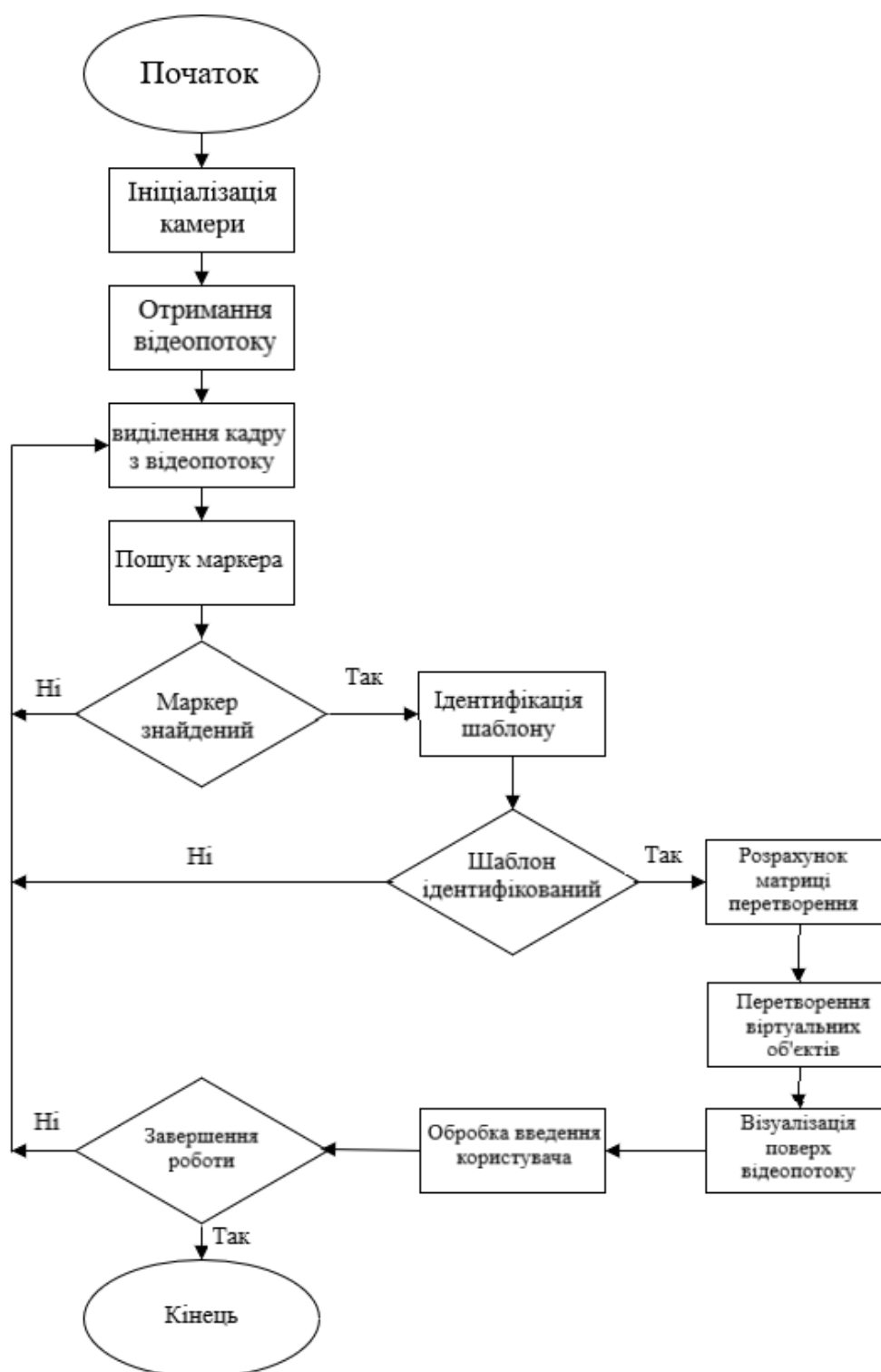


Рис. 3.3. Алгоритм роботи програми доповненої реальності

Існують декілька підходів, які є найпоширенішими для створення програм для доповненої реальності [58]: 1) застосунки, що використовують маркери; 2) застосунки, які не використовують маркери. Застосунки на основі маркерів - це QR-коди, різноманітні фотографії на інші об'єкти у реальному світі, завдяки цим маркерам пристрій розпізнає об'єкт і накладає його цифрову

модель на реальну поверхню. Реалізація цієї технології базується на програмних бібліотеках, як: ARToolKit та Vuforia. Для прикладу контент який створений Physics Playground [59], додаток функціонує як інтерактивний посібник із фізики, що дозволяє моделювати типові або авторські експерименти з урахуванням маси тіл, аналізу сил, траєкторій та інших фізичних властивостей. Ще одним інноваційним рішенням для медичної освіти є проєкт Anatomy4D: після сканування смартфоном спеціального коду з підручника [60, 61] на екрані з'являється деталізована тривимірна модель анатомічної структури.

Другий підхід ґрунтується на безмаркерній технології, що використовує датчики мобільного пристрою: GPS, Bluetooth, Wi-Fi, гіроскоп, компас, акселерометр та сенсор швидкості. Залежно від функціонала додатка, система накладає умовну «сітку» [62] на навколишнє середовище, а спеціальні алгоритми ідентифікують опорні точки для точного позиціонування віртуальної моделі. Розробка таких рішень зазвичай здійснюється за допомогою інструментів EasyAR [63] або WikiTude.

Обґрунтування вибору конкретної технології для створення навчального контенту потребує комплексного аналізу переваг, недоліків та функціональних можливостей двох домінуючих підходів у галузі доповненої реальності (AR): маркерного та безмаркерного. Ці технології знаходять широке застосування в освітньому процесі — від базової середньої освіти до вищої школи, а також у професійній діяльності, зокрема в архітектурі, дизайні, медицині, наукових дослідженнях та мистецтві [64]. Дані для порівняння наведені у табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Порівняльна характеристика маркерної
та безмаркерної технології

Основні характеристики	AR на основі маркерів	AR на основі безмаркерної технології
Розпізнавання	Потрібен спеціальний маркер для розпізнавання	Розпізнавання об'єктів в реальному часі

Точність розпізнавання / відстежування	Висока точність, маркери можуть бути деталізованими	Низька точність, відсутні фіксовані точки опори для визначення положення AR об'єктів
Відтворення	Обмежена можливість відтворення великих об'єктів	Широкі можливості відтворення великих об'єктів
Масштабування	Обмежена можливість, маркер може бути зчитаний тільки з обмеженої відстані	Немає обмежень масштабування об'єктів
Продуктивність	Може бути менш продуктивним через потребу в постійному розпізнаванні маркерів	Більш продуктивний через можливість безперервного розпізнавання об'єктів
Доступність	Обмежена доступність та можливість пошкодження чи втрати маркерів	Технологія більш доступна через те що не потрібні спеціальні маркери

Для розробки відповідного програмного забезпечення використовуються спеціалізовані інструментарії розробки (SDK — Software Development Kit). Сучасний ринок пропонує широкий спектр SDK, що відрізняються за технічними характеристиками та функціями. У таблиці 3.2 наведено порівняльний аналіз найбільш поширених інструментів розробки, зокрема Vuforia Engine, Wikitude, ARKit, Kudan та EasyAR, з урахуванням ключових відмінностей та можливостей інтеграції.

Таблиця 3.2.

Порівняльна характеристика SDK для AR технологій

Характеристики	Vuforia	Wikitude	ARKit	Kudan	EasyAR
Підтримка марк. та безмарк технологій	Обидві	Обидві	Тільки безмаркерна	Обидві	Обидві
Платформи для використання	Android, iOS, Unity, UWP, HoloLens	android, iOS, Xamarin	iOS	Android, iOS	Android, iOS, Unity, Windows, MacOS
Розпізнавання обличчя	Є підтримка	Є підтримка	Є підтримка	Немає підтримки	Є підтримка
Віддаленість відстеження	До 2 м.	До 3 м.	До 60 см.	До 3 м.	До 3 м.

Розпізнавання звуку	Ні	Так	Так	Так	Ні
Відстеження руху	Так	Так	Так	Так	Так
Особливості	Висока точність розпізнавання маркерів та образів, відтворює аудіо та відео на об'єктах	Підтримка аудіо та відео, робота без інтернет мережі	Може взаємодіяти з глобальною позицією камери, підтримка AR шаблонів, відображення відомостей про предмети на екрані	Підтримка AR та VR, взаємодія з геопозицією, висока точність розпізнавання маркерів та образів	Хмарне розпізнавання, відстежування 3D-об'єктів, запис екрана

Готові SDK мають свої переваги, Vuforia має високу точність розпізнавання маркерів та образів, Wikitude підтримує аудіо та відео на AR об'єктах, ARKit ексклюзивна технологія для iOS пристроїв, Kudan висока взаємодія з GPS, HP Reveal має високу точність розпізнавання звуку та велику відстань відстеження.

3.4. Функції AR в друкованих виданнях, можливість використання в навчальних підручниках

Технології доповненої реальності (AR) поступово трансформують класичну друковану інформацію, відкриваючи нові можливості для взаємодії читача з поданим матеріалом. У видавничій сфері AR не тільки інструмент інтерактивного збагачення друкованої продукції, але важливий елемент модернізації комунікаційних процесів між автором, видавцем і читачем. Інтеграція цифрових об'єктів у фізичне середовище друкованої сторінки дозволяє зняти обмеження звичайного паперового носія та створити багаторівневий інформаційний простір, у якому друкований і цифровий контент функціонують як єдина система. Доповнена реальність дозволяє інтегрувати великі обсяги інформації у друковане видання за допомогою QR

кодів з алгоритмами розпізнавання зображень, 3D моделей, аудіо чи відеоматеріалів, анімації та інші інтерактивні схеми. Так ще у далекому 2012 році «Metro» (назва шведської газети), інтегрувала функцію AR, для взаємодії читача з надрукованою інформацією. «Metro» застосувало інноваційний підхід доповнивши друковані статті функціями соціальних мереж, а інтеграція зі сторінками Facebook дозволяє ставити вподобання, коментувати та ділитися (рис. 3.4.), бонусний музичний контент, відеосюжети для доповнення друкованих новин і зображення та інтерактивна художня галерея [65].



Рис. 3.4. Функції Facebook у шведському «Metro»

Іншим прикладом слугує журнал «Esquire» який став першим друкованим виданням (рис. 3.5), що випустило повноцінний номер із технологією доповненої реальності у грудні 2009 року. Цей інноваційний проєкт був створений для залучення аудиторії до друкованих медіа через інтерактивні цифрові елементи.



Рис. 3.5. Титульна сторінка доповненої реальності випуск «Esquire»

Варто наголосити, що функціональний потенціал технології доповненої реальності (AR) не вичерпується лише оптимізацією друкованого простору через когнітивне "згущення" та компакту візуалізацію значних обсягів інформації. Першочергове значення AR полягає у впливі на сенсорне сприйняття користувача шляхом інтеграції інтерактивних цифрових медіа, які не лише доповнюють традиційні друковані видання, а й якісно покращують їхні комунікативні та дидактичні властивості [66].

Освітній сектор є однією з галузей, де AR демонструє один з найбільших потенціалів. У навчальних підручниках технологія виконує функції, що безпосередньо впливають на ефективність навчання, когнітивну активність учнів та можливість індивідуалізації освітнього процесу. Технології доповненої реальності застосовуються у різних сегментах друкованої продукції [67], їх функціональне призначення та очікуваний ефект суттєво відрізняються залежно від контексту використання, в таблиці 3.3. наведено порівняння функцій AR у друкованих ЗМІ та навчальних підручниках.

Таблиця 3.3.

Порівняння основних функцій AR у друкованих ЗМІ та навчальних підручниках

Функція AR	Друковані ЗМІ	Навчальні підручники
Інформаційний простір	Відеосюжети, соціальні платформи, інтеграція рекламних матеріалів	Візуалізація складних понять, 3D моделі, симуляції, інтерактивні карти
Залученість користувача	Заохочення взаємодії з брендом чи медіа, збільшення часу контакту з наданою інформацією	Активізація пізнавальної діяльності, формування дослідницької поведінки
Мультимедіа	Перехід до онлайн матеріалів, соціальних мереж, мультимедійних галерей	Інтеграція з електронними освітніми платформами, LMS, відео-лекції
Персоналізація	Таргетований контент	Адаптація навчального матеріалу під рівні учнів, адаптивні завдання
Візуалізація складних об'єктів	Декоративна або рекламна функція	Ключовий дидактичний інструмент для пояснення процесів
Мотиваційний ефект	Підвищення зацікавлення до друкованого видання	Підвищення мотивації до навчання
Оновлення контенту	Оперативне оновлення матеріалів новин	Можливість актуалізувати навчальний контент без перевидання підручника

Таблиця демонструє, що основні механізми AR однакові, та їхня роль у різних видах друкованої продукції суттєво відрізняється. В освіті AR стає структурним елементом навчального процесу.

Порівняння двох різних підходів (рис. 3.6) до створення навчального AR контенту є важливим для дослідження оскільки є потреба у врахуванні складності розробки, вимог до інфраструктури, системними вимогами та підтримкою старіших версій мобільних пристроїв.

Unity	WebAR Studio
Тип Ігровий рушій	Тип Онлайн-платформа
Складність Висока	Складність Низька
Випадки використання Складні AR-додатки Інтерактивні 3D-сцени	Випадки використання Веб-AR Маркерні зображення
Формат публікації Мобільні додатки	Формат публікації Веб-браузер

Рис. 3.6. Порівняння Unity та WebAR Studio

Unity – це потужний ігровий рушій [68] та середовище розробки, який використовується для створення складних 2D та 3D застосунків з використанням різних бібліотек AR Foundation.

WebAR Studio – технологія AR, що працює через браузер, використовує веб-стандарти та фреймворки. Технічні характеристики наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики Unity та WebAR

Параметр	Unity	WebAR
Тип платформи	Windows, MacOS, Linux	Будь-який браузер
Технологічна база	Ігровий рушій, ARCore, ARKit	веб-технології: WebXR, WebGL, JavaScript
Складність розробки	Висока: знання рушія Unity, мови програмування C#	Низька: no-code інструмент
Вимоги до процесора	Multi-core (рекомендовано Intel Core i5/i7 або AMD Ryzen 5/7+, 6+ ядер)	достатньо сучасного CPU з 4+ ядрами

Вимоги до оперативної пам'яті	Мінімум 8 GB Рекомендовано 16–32 GB (64+ GB для великих проєктів / HDRP / light baking)	8 GB достатньо Рекомендовано 16 GB+ для комфортної роботи в браузері
Вимоги до відеокарти	DirectX 11 / Metal / Vulkan сумісна, рекомендовано NVIDIA RTX / AMD Radeon з 4+ GB VRAM	WebGL 2 сумісна (будь-яка сучасна інтегрована або дискретна)
Обсяг пам'яті на SSD/HDD	10+ GB для Unity Hub + Editor + модулі Додатково 20–100+ GB на проєкти	Все знаходиться і зберігається в хмарі
Оптимальне використання	Повноцінна 3D/AR/VR розробка, великі проєкти, високоякісний рендеринг	Швидке прототипування WebAR, кросплатформні AR без встановлення застосунку
Вартість розробки	Вища, оскільки потребує більше часу на розробку та залучення кваліфікованих спеціалістів.	Нижча, особливо для простих проєктів

Unity оптимальний для складного AR функціоналу, є можливість створення власного мобільного додатку, необхідні складні 3D взаємодії та симуляції. WebAR оптимально працює з інтеграцією до підручника, журналу чи газети, простота використання без додатків або тільки при необхідності, контент менш складніший.

Недоліки Unity полягають в високих системних вимогах, потрібні потужні обчислювальні системи (комп'ютери), знання мов програмування та навичок роботи з багатofункціональною програмою, обов'язкове встановлення застосунку, підключення різних плагінів.

Проаналізовано інформацію по іншим онлайн платформам які працюють з доповненою реальністю та наведено порівняльну таблицю цих платформ для освіти з використанням AR (табл. 3.5.).

Таблиця 3.5.

Онлайн платформи з AR для використання в освіті

Платформа	Функціональність	Доступність	Приклади використання
MyWebAR	Без коду, маркерна та безмаркерна, сканування обличчя, геолокація, бібліотека 3D моделей, інтеграція з LMS	Платна, безплатна версія з лімітами (відсутність мультисцени, 100 доступних оглядів, 100 MB доступного місця)	Віртуальні лабораторії, AR підручники, інтерактивні плакати
Blippar WebAR	Маркерна та безмаркерна, відстеження поверхні, інтеграція з Unity, A-frame, Babylon.js, PlayCanvas	Платна	AR уроки, інтерактивні презентації, інтерактивний контент для маркетингу
PlugXR	Без коду, створення AR та VR, підтримка 3D моделей, симуляцій, віртуальних турів, бібліотека 3D моделей, геолокація, відстеження поверхні, відстеження зображення	Платна, безплатна версія з лімітами (14 днів)	Інтерактивні уроки, віртуальні табори, AR проекти для студентів
WebAR Studio	Без коду, підтримка 3D моделей, бібліотека 3D об'єктів, геолокація, відстеження поверхні, відстеження зображення	Платна, безплатна з лімітами (менше ніж 9 сцен та ліміт розміру завантажень 3D моделі до 25 мб за одну)	Візуалізація навчальних матеріалів, інтерактивні підручники, AR активності для залучення студентів
AR Code	Без коду, маркерна, відстежування обличчя, автоматична оптимізація	Платна, безплатна версія з лімітами (3	Віртуальні лабораторії, AR інструкції, інтерактивні вправи

		AR коди, 1000 сканувань на місяць)	
ARloopa Studio	Без коду, маркерна та безмаркерна, геолокація, відстежування обличчя, аналітика	Платна	Віртуальні екскурсії, AR квести, STEM уроки

Усі платформи дозволяють створювати AR проєкти без застосування програмування, та мають підтримку базових сценаріїв для освіти, дозволяючи накладати 3D моделі, анімації, аудіо чи відео на об'єкти в реальному світі. Кожна з них має власну бібліотеку 3D моделей, але обмежену. Власний застосунок надає перевагу платформам: Blippar, PlugXR, WebAR Studio, ARloopa, через продуктивність (мають прямий доступ до процесора та графічного прискорювача, що дозволяє відображати складні 3D-моделі з високою деталізацією та реалістичними текстурами без затримок які можуть виникати в браузері), особливо якщо працювати з створеним навчальним контентом який містить велику кількість тригерів, 3d моделей та інших аудіо-відеоматеріалів. Інтеграція Web AR в навчальний процес відкриває нові можливості для вивчення дисциплін, застосовуючи візуальну та інтерактивну складову, платформи забезпечують широкий вибір інструментів для створення, редагування та впровадження доповненої реальності які доступні для педагогів без технічних знань чи знань програмування.

Аналіз сучасних платформ для створення AR-контенту демонструє, що всі вони забезпечують можливість розробки освітніх проєктів без необхідності програмування, пропонуючи базові та розширені інструменти для накладання [69] 3D-моделей, анімацій, аудіо та відео на реальні об'єкти (тригери). Попри наявність власних бібліотек 3D-ресурсів, їхній обсяг залишається обмеженим, що часто потребує імпорту зовнішніх моделей. Платформи з власними мобільними застосунками — Blippar, PlugXR, WebAR Studio та ARloopa — мають суттєву перевагу у продуктивності [70], оскільки забезпечують прямий доступ до апаратних ресурсів пристрою, це безпосередньо важливо для

навчального контенту з великою кількістю тригерів, складних 3D-моделей та мультимедійних матеріалів, де браузерні рішення можуть створювати затримки. Інтеграція WebAR у навчальний процес розширює можливості викладання, додаючи візуальну, інтерактивну та практичну складову. Доступність інструментів для створення та редагування AR матеріалів без технічних знань робить ці платформи ефективним засобом для педагогів, сприяючи впровадженню інноваційних методів навчання.

Висновки до розділу 3

1. Проведене дослідження дозволило сформуванню структури інформаційної технології створення AR-навчального контенту як цілісної системи взаємопов'язаних модулів, яка охоплює повний цикл від збору вхідних даних до отримання AR-освітнього продукту. Інформаційна технологія реалізується як сукупність взаємопов'язаних функціональних модулів, кожен з яких виконує окрему функцію у перетворенні педагогічних, технологічних та експертних даних у навчальний продукт.

2. Визначено, що центральним елементом технології є аналітичний модуль, в якому реалізовано багатокритеріальну модель підтримки прийняття рішень на основі методів: АНР забезпечує побудову ієрархічної структури критеріїв і підкритеріїв, метод BWM — для уточнення вагових коефіцієнтів критеріїв, та методу TOPSIS — для визначення відносної близькості альтернатив до ідеального рішення та вибір оптимальної платформи. Така комбінація дозволила формалізувати систему критеріїв, визначити їх вагомість, перевірити узгодженість експертних оцінок та здійснити ранжування альтернативних AR-платформ.

3. Встановлено, що модуль проектування AR-контенту забезпечує трансформацію результатів аналітичного вибору платформи, педагогічних вимог, характеристик цільової аудиторії та наявних ресурсів у проектну модель майбутнього навчального продукту. Це дозволяє узгодити педагогічні цілі з

технічними можливостями обраної платформи. Модуль реалізації забезпечує практичне створення контенту, включаючи побудову 3D-моделей, інтеграцію мультимедійних елементів та налаштування AR-середовища та тестування. Завершальним етапом є модуль вихідних даних, який формує кінцевий AR-продукт, результати анкетування та рекомендації щодо впровадженнь.

4. Проаналізовано алгоритми роботи AR-програм, включаючи маркерні та безмаркерні підходи. Маркерна технологія є стабільнішою та точнішою в порівнянні з безмаркерною технологією, але має обмеження в кількості можливих сценаріїв та масштабування об'єктів. Безмаркерна технологія в свою чергу є гнучкою та мобільнішою, але вимагає високої обробки даних. Наведено порівняльну характеристику онлайн-платформ для створення AR-контенту. Це дозволило визначити переваги та недоліки кожної платформи, зокрема підкреслено, що платформи, які створили власні мобільні застосунки мають суттєву перевагу у продуктивності, що є критично важливим аспектом для складних AR-проектів.

5. Порівняльний аналіз Unity та WebAR Studio засвідчує, що ці платформи репрезентують два різні підходи до створення AR-контенту, які суттєво відрізняються за технічними можливостями, складністю розробки, вимогами до інфраструктури та сценаріями використання. Обґрунтовано, що WebAR Studio, орієнтована на швидке створення AR матеріалів без необхідності встановлення додаткових програм. Використання будь-якого браузера, технологій WebXR, WebGL, Javascript, процесора з 4 ядрами, кросплатформність та використання QR-кодів роблять цю платформу особливо придатною для інтеграції доповненої реальності у друковані видання, журнали, газети, каталоги та навчальні підручники.

6. Запропонована технологія створює методологічну основу для подальшої розробки, впровадження та масштабування навчальних матеріалів доповненої реальності у закладах освіти.

РОЗДІЛ 4.

РЕАЛІЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО КОНТЕНТУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

4.1. Оцінка можливостей інтеграції WebAR у навчальний процес

В умовах сучасної освіти цифровізація навчального процесу стала невіддільною частиною навчання, перспективні технології які трансформують освітній досвід це доповнена реальність, а саме варіант Web AR – технологія що дозволяє віртуально взаємодіяти з цифровими 2D або 3D об'єктами в реальному часі за допомогою браузера, як мобільного, так і десктоп версії в більшості без використання та встановлення додатків. WebAR використовує сучасні веб-стандарти, такі як: WebXR, WebGL, WebRTC, HTML5, JavaScript, з допомогою даних стандартів вона доступна для більшості сучасних пристроїв, підтримуючи пристрої з версіями Android, iOS, macOS, Chromebook, Linux та Windows. Легкість у використанні, оновленні та масштабуванню проєктів створених за допомогою даної технології, зміни в контенті робляться швидко і застосовуються для всіх користувачів.

WebAR успішно застосовується з освітніми ресурсами, наприклад:

- Moodle
- Google Classroom

Щоб досягти дану інтеграцію доповненої реальності потрібно залучити зовнішні сервіси які підтримуватимуть технологію, а саме використання:

- 3D моделей
- інтерактивних віртуальних лабораторій

В Google Classroom в більшості використовують посилання на готовий AR проєкт у «Завдання» або «Оголошення» вставивши посилання в інструкції. Для Moodle користуються такими рішеннями як iFrame, за допомогою

редактора HTML вставляють код який можна отримати з AR конструктора, наприклад:

```
<iframe src="https://your-webar-project.com/webar" width="100%" height="500px" allow="camera"></iframe>
```

Технічні вимоги впровадження WebAR є досить низькими та доступними для всіх учнів, технологія підтримує смартфони, планшети, нетбуки, ноутбуки які мають вбудовану камеру чи персональні комп'ютери з камерою підключеною через USB-A чи USB-C та наявності браузерів для прикладу Chrome, Safari, Microsoft Edge, Mozilla Firefox, Opera це всі сучасні браузери з підтримкою WebXR, WebGL, GetUserMedia, DeviceOrientation API. Доступ до інтернету для відкриття посилання та завантаження 3D моделей з сервера і подальшої взаємодії з ними.

Використання платформи WebAR Studio є не безпідставною, адже вона має кілька переваг порівнюючи з популярними конкурентами на ринку створення навчальних AR (Blippar, MyWebAR, PlugXR):

1. користування, створення AR необмежено в часі та можливість переглядати створений матеріал 1000 разів, для прикладу платформа PlugXR [71] дає 14 днів розширених можливостей для створення проєкту і 100 переглядів по QR коду, після завершення терміну можливість редагування створеного проєкту відсутня, платформа запитує про оформлення підписки;
2. використання декількох 3d-сцен, порівнюючи з платформою MyWebAR [72], яка не дозволяє додавати декілька сцен для одного QR коду, тільки після оформлення підписки;
3. публікація створеного контенту без підписки, порівнюючи з Blippar [56], де для публікації потрібна обов'язкова купівля підписки.

Кожна платформа має свої недоліки, включно з WebAR Studio, як і інші має внутрішню бібліотеку 3D моделей, але кількість моделей досить мала в порівнянні з Sketchfab [73], CGTrader, Free3D. Для усунення цього недоліку

було застосовано моделі з цих бібліотек, також створено 3D моделі з зображення та створено нові навчальні відео за допомогою штучного інтелекту. Вибір WEB AR studio опирається на використання безплатної версії платформи, натомість маючи такі основні характеристики:

- кількість проєктів = 10;
- об'єм сховища 1 гб;
- розмір завантажуваного відео для одного сценарію до 25 мб;
- розмір фото в тому числі й тригера до 3 мб;
- розмір аудіо до 5 мб;
- розмір 3D об'єкта до 25 мб;
- Pro 3D редактор – розширений для професійних проєктів;
- система аналітики;
- готова бібліотека 2D та 3D об'єктів.

Перспективи подальших впроваджень в освіту [74] пов'язано з інтеграцією штучного інтелекту (AI) [75, 76] та машинного навчання (ML) [77], появою AR окулярів, що дозволить створювати більш складні в тому числі й персоналізовані та інклюзивні навчальні середовища.

4.2. Web-AR Studio платформа для створення проєкту

WebAR є однією з універсальних платформ створення доповнено реальності, що дозволяє створювати потужні та професійні проєкти без навичок програмування, коду, вмінь 3D моделювання, що робить її одним з провідних інструментів інтерактивних цифрових технологій. Для створення проєктів є можливість обрати між чотирма редакторами, які дозволяють адаптувати інструменти під потреби:

- WAS Design Studio – комплексні AR проєкти;
- WAS Lite Studio – простіший редактор для швидкого створення контенту;

- WAS Universal – універсальний редактор, що підходить для різних сценаріїв;
- WAS 3D Configurator - для інтерактивної роботи з 3D моделями.

WebAR Studio надає можливість використати популярні інформаційні системи, які складаються з шести різних алгоритмів розпізнавання. Перший алгоритм це розпізнавання QR-коду (рис. 4.1.).

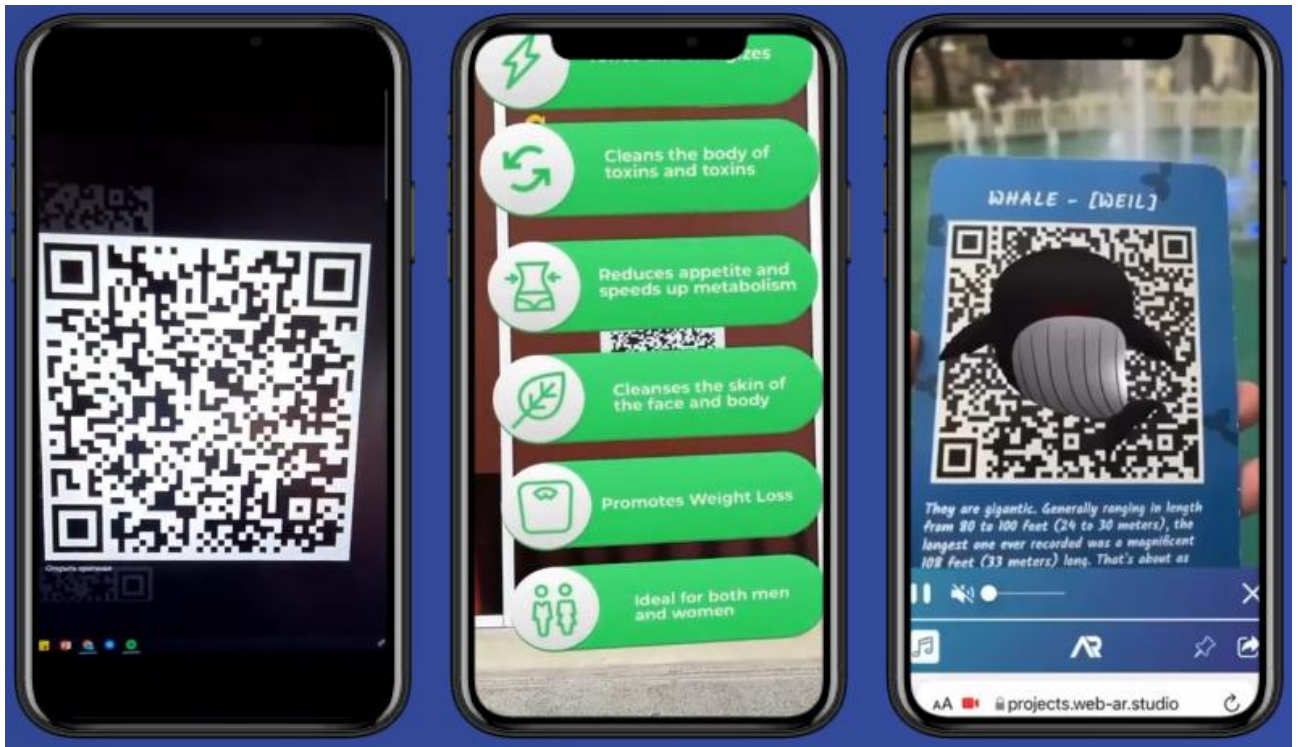


Рис. 4.1. Приклад розпізнавання QR-коду

В даному типі проєкту відбувається накладання віртуальних сцен на QR-код проєкту, AR сцена активується при скануванні QR-коду внаслідок цього перевага у високій точності активації сцени. Використовується в навчальних матеріалах з доповненнями для прикладу 3D моделі чи відео. Працює тільки в браузерному режимі проєкту.

Другий тип – це розпізнавання фото, накладання віртуальних сцен на користувацькі зображення. Заздалегідь визначене зображення слугує тригером (рис. 4.2.).



Рис. 4.2. Приклад розпізнавання по фотографії

Використовується для оживлення фотоальбомів, музейних експонатів та навчальних посібників. Перед створенням контенту є можливість обрати між двома редакторами:

1. Lite редактор – спрощений, для створення шаблонних проєктів
2. 2D/3D редактор – універсальний, для проєктів будь-якої складності

Третій тип розпізнавання – відстежування геолокації, накладання віртуальних сцен по координатах GPS (Рис. 4.3.). Активація відбувається у визначеному географічному місці за попередньо заданими координатами, застосовується для туристичних маршрутів з AR навігацією або відеоігри доповненої реальності:



Рис. 4.3. Приклад розпізнавання по геолокації

При виборі даного типу розпізнавання використовується додаткова програма *AR Studio Viewer* – мобільний застосунок для перегляду створеного контенту за допомогою доповненої реальності, використовується для більших проєктів, які мають мультисцени або велику кількість 3D моделей, доступний для завантаження на Android та iOS. В браузері тип розпізнавання по геолокації не працюватиме.

Четвертий тип – розпізнавання поверхні, об’єкти доповненої реальності розміщуються на фізичних площинах, накладання віртуальних сцен на поверхні реального світу (рис. 4.4.).



Рис. 4.4. Приклад розпізнавання поверхні

Для цього типу є 2 варіанти вибору проєкту:

1. SLAM – створення складних інтерактивних 3D сцен з різноманітними інтерфейсами. Працює в браузері та в застосунку AR Studio
2. 3D конфігуратор – створення 3D конфігуратора або візуалізація певної 3D моделі. Працює тільки в браузері.

П'ятий тип проєкту це AR 360 – створення віртуальних сцен, які з'являються навколо користувача, застосовуються для віртуальних турів, імерсивних освітніх середовищ, експозицій у сфері мистецтва та культури. Використання відбувається тільки у браузері.

Шостий тип Face Tracking – накладання віртуальних сцен на обличчя користувача, AR елементи відображатимуться на лиці в реальному часі. Використовується для фільтрів у соціальних мережах, віртуальні аксесуари або макіяжі, освітні симуляції для прикладу анатомія обличчя, основна перевага даного типу проєкту це швидка інтерактивність. Усі ці типи проєктів дозволяють створювати контент доповненої реальності під різні сценарії, особливо для навчального процесу.

На рисунку 4.5, зображено вигляд AR середовища на платформі WebAR Studio.

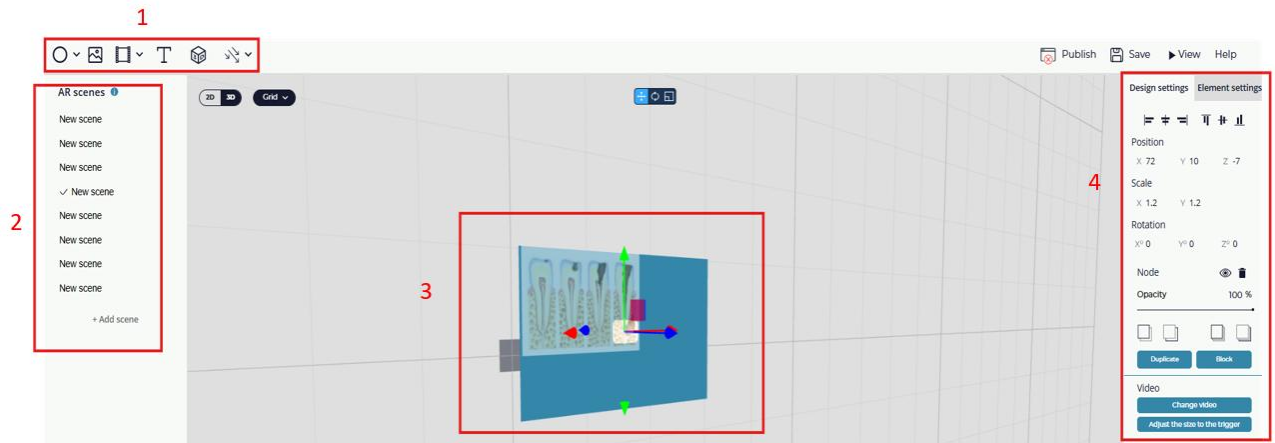


Рис. 4.5. AR середовище в платформі WebAR Studio

1. Блок містить функції додавання елементів: зображення, відео, текст, 3D моделі, форми кругів та квадратів, додавання світла (направлене, сферичне, точкове, прожекторне, навколишнє).

2. Блок містить додані сцени в AR середовищі, дозволяє змінювати назву кожної сцени, дублювати та видаляти

3. Відображення об'єкта (відео, 3d модель) та тригера на сітці

4. Налаштування сцени (зміна та налаштування тригера, додавання аудіо, анімаційний перехід між сценами), дизайн елементу (позиціонування, масштаб, поворот, прозорість, повороти, анімація 3D об'єкта).

Створено блок-схему дослідницького процесу (рис. 4.6.), що вміщує декілька блоків які відтворюють етапи дослідження:

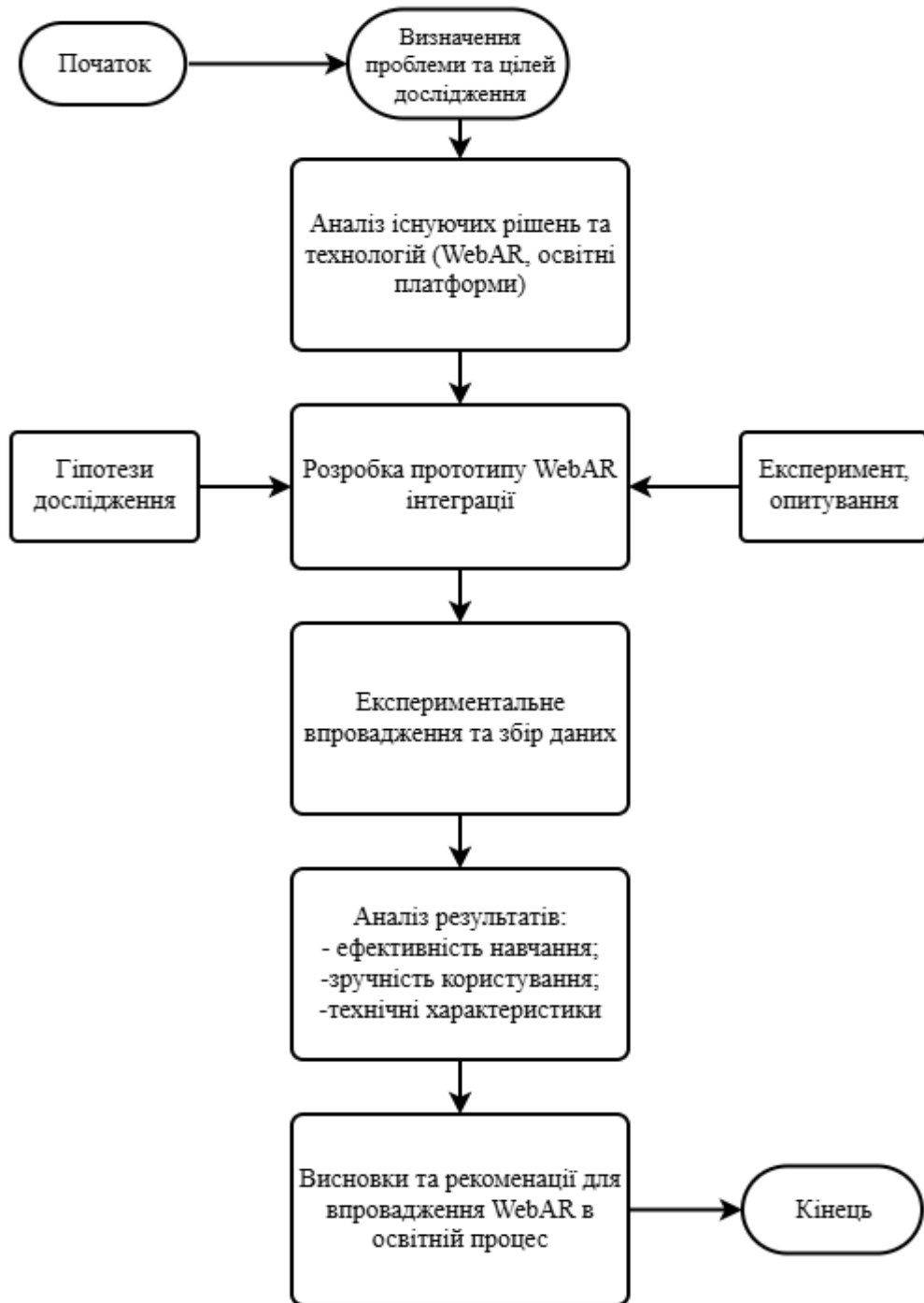


Рис. 4.6. Блок-схема дослідницького процесу

Схема ілюструє поетапний підхід до дослідження інтеграції WebAR у навчальне середовище, яка складається з восьми логічно пов'язаних між собою етапів, що відображають послідовність наукового аналізу, розробки, впровадження та оцінювання технології. Чітке формулювання актуальності, аналіз існуючих технічних рішень та платформ, створення функціонального рішення для тестування, визначення способу збору даних, практичне

застосування в навчальному процесі, оцінка ефективності створеного навчального AR контенту, узагальнення результатів та рекомендацій.

4.2.1. Тип розпізнавання по фотографії

Для проведення дослідження було вибрано шкільний підручник «Біологія 8 клас Балан 2025» [78], автор Балан, Козленко, Кулініч, Юрченко, Остапченко. Тема 4 «Травна система. Процеси метаболізму». Дана тематика досить складна для розуміння без додаткових ілюстрацій, наприклад відео чи об'ємних зображень, невідмінно від рисунків у підручнику які є нерухомими, можуть бути нечіткими, відсутній зв'язок між учнем та статичною ілюстрацією. За допомогою доповненої реальності можна відобразити не тільки роботу органів, а й окремі органи і побачити їх з різних кутів на екрані смартфона.

Для створення даної роботи було обрано такі складові:

1. Photo recognition – тип проєкту відображення моделі по малюнку
2. 2D/3D editor – обрана складніша версія проєкту
3. AR Studio Viewer – проєкт буде доступний у мобільному додатка, оскільки при використанні додатка можна залучати до 50 оживаючих фото, а для браузера тільки до дев'яти.

Для створеного проєкту надається унікальний QR-код (рис. 4.7.), також є можливість додатково завантажити код, щоб при необхідності додати його до своїх навчальних уроків:

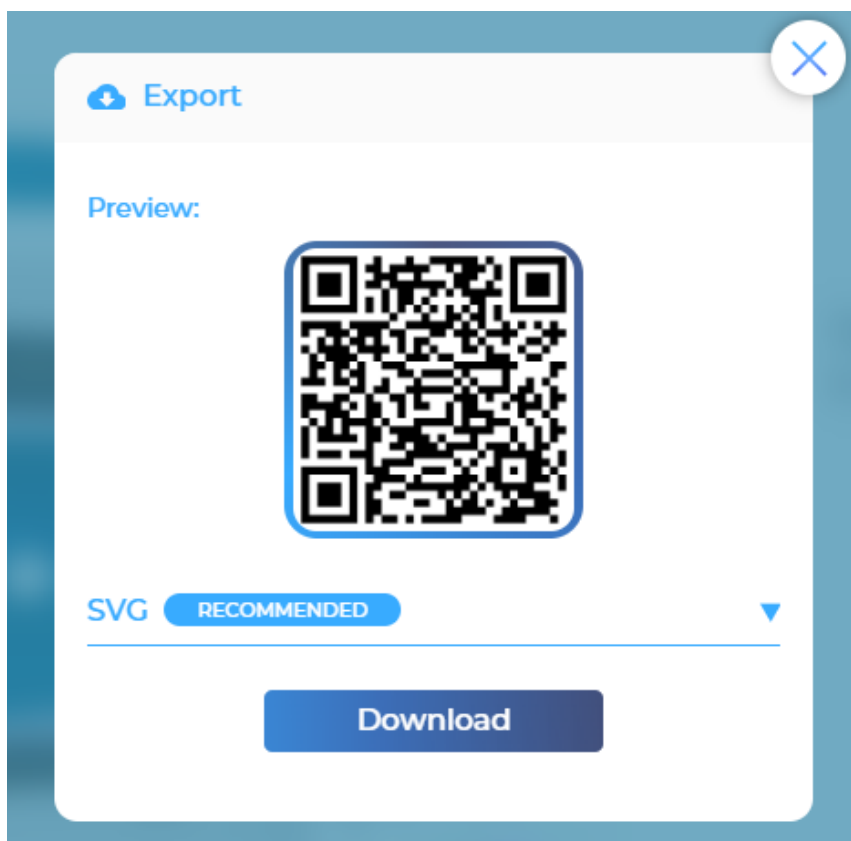


Рис. 4.7. QR-код створеного проєкту

Режим Image Tracking AR контент прикріплюється до конкретного зображення, коли користувач наводить камеру смартфона на картинку, програма його розпізнає і відображає 3D модель, аудіо чи відео. Ефективність роботи таких систем значною мірою залежить від якості зображення-тригера [79] (табл. 4.1.), алгоритмів його аналізу та здатності системи до точного відстеження у реальному часі. WebAR Studio використовує механізм Image Tracking, що базується на методах комп'ютерного зору та виявлення ключових точок.

Таблиця 4.1.

Основні критерії оцінювання тригерних зображень у WebAR

Критерій	Опис	Вплив на відстежування
Контраст	Наявність різких переходів між світлими та темними ділянками	Висока контрастність підвищує точність виявлення ключових точок

Текстура	Кількість дрібних деталей та нерегулярних структур	Забезпечує стабільність простежування при зміні ракурсу
Унікальність патернів	Відсутність повторюваних елементів	Зменшує ризик помилкових збігів
Розподіл ключових точок	Рівномірність інформативних областей по всій площині	Підвищує стійкість при частковому перекритті
Роздільна здатність	Кількість пікселів, що визначає деталізацію	Впливає на кількість доступних ключових точок
Відсутність артефактів	Мінімізація шумів, розмиття, JPEG-компресії	Покращує якість дескрипторів

Web AR автоматично перевіряє завантажені зображення за певними параметрами, які визначають його ефективність як маркера. Зображення-тригер повинно містити достатню кількість контрастних елементів, рівномірно розподілення інформативних точок по всій площині. Занадто низька роздільна здатність призводить до втрати дрібних деталей, що зменшує кількість ключових точок. Рекомендації щодо мінімальної роздільної здатності узгоджуються з вимогами Vuforia та ARCore [80]. Різного роду розмиття, шуми, компресійні артефакти JPEG негативно впливають на якість відстеження.

Приклад аналізу двох тригерних зображень на платформі (рис. 4.8.):



Рис. 4.8. Аналіз якості маркерів системою WebAR Studio.

Система аналізує за допомогою алгоритмів, які визначають локальні області з високим контрастом, наявність дрібних деталей, рівномірність розташування ключових точок по площині зображення (табл. 4.2.). В лівій частині анатомічної ілюстрації ШКТ та в правій частині анатомії зубів:

- в зеленій зоні знаходяться сфінктер, м'язова оболонка, емаль, карієс, вони мають чіткі контури, текстуру, підписи, кольорові переходи, велика кількість ключових точок відповідно висока якість відстежування;
- в жовтій зоні знаходяться тіло, слизова, середні ділянки зуба, які є менш деталізовані, але мають хороший контраст, відповідно помірна якість відстежування;
- червона зона це однотонні ділянки текстур, поверхні та фонові області, низька якість для відстежування.

Таблиця 4.2.

Параметри для аналізу зображення

Колір	Інтерпретація	Поведінка системи
Зелений	Висока деталізація	Стабільне розпізнавання, швидкий запуск AR
Жовтий	Помірна деталізація	Можливі затримки або втрата відстежування
Червоний	Низька деталізація	Тригер не спрацюватиме, система може не активуватись

Система в платформі WebAR сприймає тригерне зображення як набір ознак, які вона зіставляє з відеопотоком з камери (рис. 4.9.). Якість тригера є критичним фактором для успішної реалізації створених користувачем сцен.

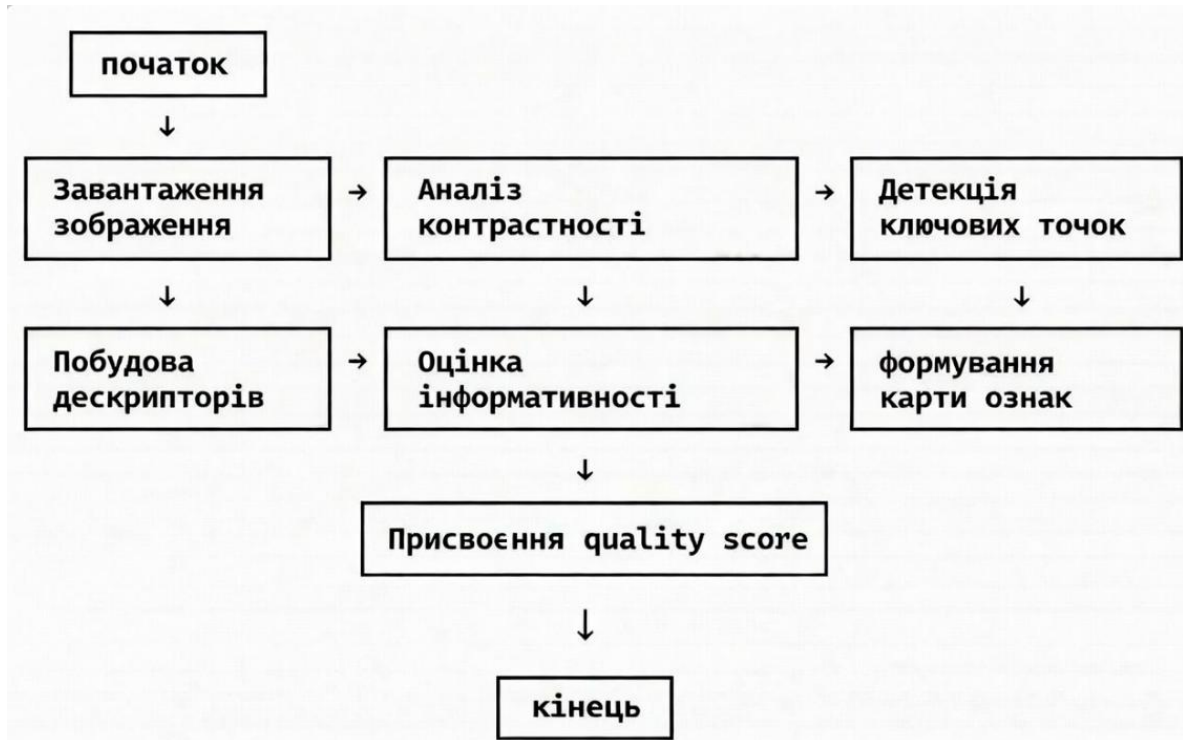


Рис. 4.9. Схема процесу обробки тригерного зображення у WebAR Studio

Під час завантаження тригера система виконує автоматизований аналіз зображення, спрямований на визначення його придатності для подальшого відстежування. Алгоритм розпізнавання ґрунтується на виявленні ключових точок так званих *feature points*, які характеризують локальні контрастні області з високою інформативністю. Система формує векторну карту ознак, яка надалі використовується для порівняння з даними, отриманими з камери користувача. Якщо кількість і якість ключових точок є достатніми, WebAR Studio здатна стабільно розпізнавати тригер у різних умовах освітлення під різними кутами та при часткових перекриттях.

4.2.2. Аналіз алгоритмів виявлення ключових точок на зображенні

Сучасні комп'ютерні системи дедалі частіше покладаються на автоматизовані методи аналізу зображень, що забезпечують високий рівень точності та стійкості до зовнішніх факторів. Одним із фундаментальних етапів

такого аналізу є дескриптори ключових точок – математичні вектори для опису візуальних характеристик зображення навколо певної точки, які використовуються у комп'ютерному зорі для розпізнавання об'єктів. Початковими основними сферами застосування виявлення та опису ключових точок були представлення зображень [81, 82], пошук та класифікація зображень [83], зіставлення зображень [84], 3D-реконструкція сцени [85], розпізнавання об'єктів [86], відстеження об'єктів [87, 88], класифікація текстур [89] та біометричні системи [90, 91]. Основою SLAM (одночасна локалізація та картографування) є візуальна одометрія, станом на зараз є безліч алгоритмів, які використовують ключові точки для прикладу ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF). Ключові точки поділяються на три основні типи: бінарні, градієнтні та гібридні [92, 93, 94, 95]. Бінарні дескриптори ORB та BRISK представляють локальний фрагмент зображення у вигляді бітового рядка в більшості, як побудовані на основі великої кількості простих порівнянь інтенсивності, тобто зіставлення можна виконати швидко використовуючи відстань Хеммінга. ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) - використовує кути FAST з оцінкою орієнтації та використання набору бінарних тестів типу BRIEF, це хороший компроміс між швидкістю та точністю, що широко використовується як альтернатива SIFT чи SURF. BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) - поєднує власний детектор ключових точок з круговою схемою вибірки та бінарними порівняннями, розробленими для стійкості до обертання та деяких змін масштабу, в більшості трохи важчий за ORB, але може бути стійким у певних налаштуваннях. GFTT (Good Features to Track) є класичним градієнтним детектором, в основі якого аналіз матриці Гессе та визначення локальних максимумів в полі градієнтів. Алгоритм оцінює якість певної точки яка може бути відстеженою між послідовними кадрами, що робить його ефективним у задачах відстежування. GFTT забезпечує високу точність у виявленні кутових структур, але не формує дескрипторів, тільки визначає координати ключових точок. Робота алгоритму залежить від локальних змін інтенсивності, тому він менш стійкий до масштабних

трансформацій та значних змін освітлення, в загальному GFТТ залишається одним із найшвидших методів, що робить його придатним для мобільних AR-систем, де невіддільною складовою є продуктивність. Кожен алгоритм має свої переваги під час роботи (табл. 4.3.).

Таблиця 4.3.

Порівняльна таблиця алгоритмів

Алгоритм	GFТТ, SIFT (градієнтні)	KAZE, ORB (Гібридні)	FAST+BRIEF (бінарні)
Тип	детектор	детектор + дескриптор	дескриптор
Принцип роботи	аналіз градієнтів, матриця Гессе	інтегральні зображення, нелінійна дифузія, масштабний простір	порівняння інтенсивностей у локальних патернах
Стійкість до масштабу	низька	середня + висока	низька
Стійкість до поворотів	середня	висока	низька
Стійкість до освітлення	середня	висока + дуже висока	низька
Швидкість	дуже висока	висока + дуже висока	дуже висока
Обчислювальна складність	низька	середня + висока	низька
Придатність для мобільних AR	висока	висока	висока

Було проведено порівняльний аналіз п'яти алгоритмів виявлення ключових точок (рис. 4.10.) - GFТТ, SIFT, KAZE, ORB, FAST+BRIEF на зображенні яке ілюструє стадії розвитку карієсу та встановлено точну кількість ключових точок на зображенні.

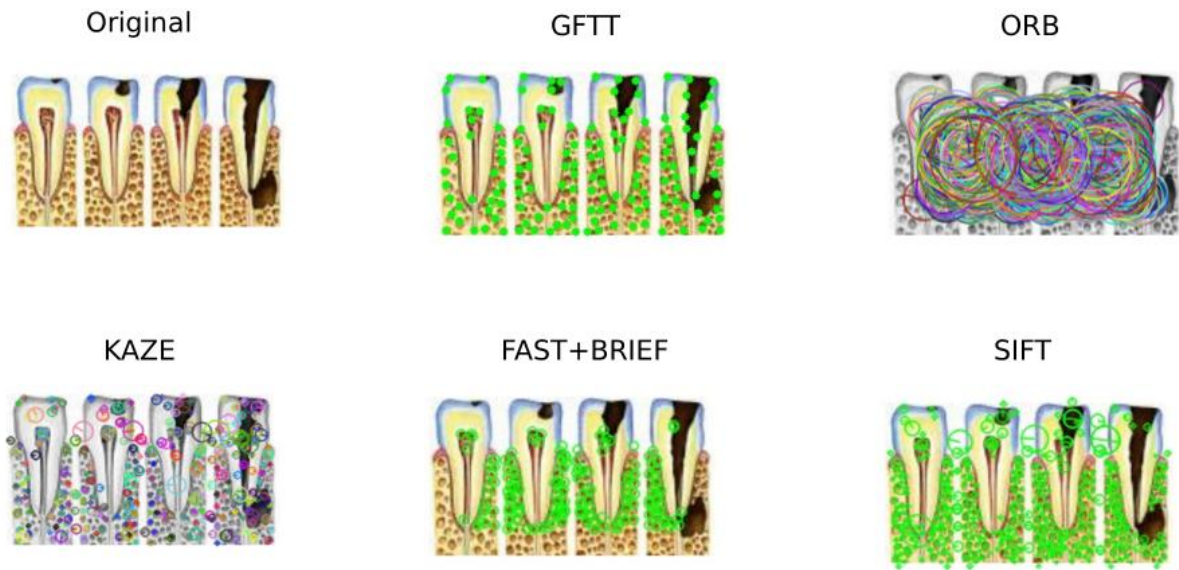


Рис. 4.10. Ключові точки виявлені п'ятьма методами

Кількість виявлених точок для кожного методу: GFTT метод – 148, SIFT метод – 534, KAZE метод – 363, ORB метод – 506, FAST+BRIEF метод – 293 / 157 встановлених ключових точок. Загалом, результат розпізнавання вище 80% можна досягти, якщо ключових точок понад 44, а об'єкт не дає занадто багато відбиття [96].

Для реалізації алгоритмів дескрипторів та детекторів, зазвичай використовують Python-скрипт та бібліотеку OpenCV (Open Source Computer Vision Library). Ініціалізація коду для кожного алгоритму наведено в додатку В. Microsoft Visual Studio [97] використано як середовище розробки для відтворення алгоритмів пошуку ключових точок зображення. Назва ключового зображення «teeth» формат PNG.

- GFTT показав помірну щільність ключових точок, зосереджену переважно на межах між емаллю та дентином та навколо каріозних уражень. Алгоритм менш чутливий до текстурних [98] змін у глибших шарах тканин.
- SIFT виявив більшу кількість точок, а саме в зонах з високим контрастом на межах емалі, дентину та в ділянках карієсу, алгоритм добре працює

на зображеннях з різною роздільною здатністю, але потребує більше обчислювальних ресурсів.

- KAZE охопив всі анатомічні структури — від емалі до альвеолярної кістки, здатність алгоритму адаптуватися до нелінійних змін яскравості робить його особливо ефективним для медичних зображень з неоднорідною текстурою, але висока щільність точок може бути певним недоліком та ускладнити подальшу обробку.
- ORB забезпечив збалансовану кількість точок, зосереджену на межах структур та каріозних ураженнях, перевагою даного алгоритму є швидкість і ротаційна інваріантність, алгоритм продуктивний в WebAR-сценаріях.
- FAST+BRIEF виявив найменшу кількість точок, оскільки це не детектор і лише описує вже знайдені точки, ефективність алгоритму залежить від якості попереднього детектора. Метод оптимальний для завдань, де важлива швидкість не беручи до уваги критичну точність.

На рисунку 4.11, відображено порівняння кількості ключових точок, виявлених різними алгоритмами комп'ютерного зору



Рис. 4.11. Кількість встановлених ключових точок

Як ілюструє діаграма алгоритми SIFT та ORB забезпечують найбільшу кількість ключових точок, тоді як GFTT та BRIEF демонструють меншу щільність ознак, що може впливати на точність подальшого аналізу.

Для завдань з таким важливим фактором, як максимальна деталізація, підходить алгоритм SIFT, для швидкості обробки в реальному часі це ORB або градієнтний GFTT, алгоритм KAZE оптимальний для масштабної інваріантності, BRIEF найкраще використовувати в поєднанні з FAST. Тобто вибір того чи іншого алгоритму залежить від цілей проєкту: відстежування, діагностики чи візуалізації в доповненій реальності.

4.2.3. Поєднання 3D моделей з тригерами

Для дослідження використано такі великі онлайн-бібліотеки 3D моделей як: Sketchfab, Free3D та специфічні моделі на веб-ресурсі University of Dundee, School of Dentistry. Sketchfab є однією з найпоширеніших онлайн-платформ для публікації, перегляду та обміну інтерактивними 3D-моделями, основна роль якої полягає в тому, що рендеринг відбувається безпосередньо у веббраузері за допомогою WebGL, що робить 3D-контент доступним без встановлення спеціалізованого програмного забезпечення. Завдяки цьому Sketchfab став фактично стандартом для швидкого поширення 3D-даних у наукових, освітніх, інженерних та креативних сферах. Платформа підтримує понад 50 форматів 3D-файлів, включно з OBJ, FBX, STL, PLY, GLTF/GLB, що робить її універсальним інструментом для роботи з моделями, отриманими з різних джерел, від фотограмметрії та 3D-сканування до процедурного моделювання чи медичних реконструкцій. Вбудований переглядач дозволяє налаштовувати матеріали, освітлення, шейдери, а також створювати анімації та анотації, що є корисним для наукової комунікації та демонстрації складних структур. Платформа дозволяє використовувати різні типи ліцензій для 3D моделей:

- Creative Commons – основний тип ліцензії, де автор може дозволити або обмежити комерційне використання, такий тип позначається скороченнями: CC0, CC-BY, CC-BY-SA, CC-BY-NC, CC-BY-NC-SA, CC-BY-ND
- Royalty-Free License – тип ліцензії, знаходиться в Sketchfab Store, дає можливість покупцю використовувати завантажену модель у будь-яких комерційних проєктах;
- Editorial License – дозвіл надається виключно використання моделей в некомерційних чи освітніх цілях, такий тип має захищену інтелектуальну власність.

Наявність різних типів доступних ліцензій робить платформу відкритою до науки. Sketchfab інтегрований з десктоп програмами Blender, Unity, Unreal Engine, Adobe Substance. Платформа сприяє розвитку відкритої науки, через те що більшість моделей мають ліцензію Creative Commons, таким чином це робить платформу важливою частиною екосистеми цифрової науки.

На платформі Sketchfab є декілька форматів для вибору завантаження 3D-моделей:

1) формат OBJ є одним із найпоширеніших у 3D-графіці, даний формат зберігає геометрію моделі у вигляді списків вершин та текстурних координат. OBJ не підтримує складні матеріали, анімацію чи фізично коректні шейдери, його універсальність робить його стандартом для обміну статичними моделями між різними програмами. Через текстову структуру файли OBJ можуть бути відносно великими, але легко можуть бути прочитані та конвертуватись. Фрагмент специфікації формату OBJ:

```
# проста модель трикутника
o TriangleObject      # Об'єкт з назвою "TriangleObject"
v 0.0 0.0 0.0         # Вершина 1 (x, y, z)
v 1.0 0.0 0.0         # Вершина 2
v 0.0 1.0 0.0         # Вершина 3
vt 0.0 0.0            # Текстурна координата для вершини 1 (u, v)
```

```

vt 1.0 0.0          # Для вершини 2
vt 0.0 1.0          # Для вершини 3
vn 0.0 0.0 1.0      # Нормаль для всіх вершин (направлена вздовж осі
Z)

g TriangleGroup     # Оголошення групи
f 1/1/1 2/2/1 3/3/1      # Грань: вершини 1, 2, 3 з текстурними
координатами 1, 2, 3 і нормаллю 1
}

```

Пояснення щодо структури: o – оголошення об'єкта, v – координати точок у 3D просторі, vt – нормалі, потрібні для освітлення та рендерингу, g – логічне об'єднання граней, f – грань, складається з трьох вершин (індекс вершини, індекс текстури, індекс нормалі).

2) формат USDZ – розроблений компанією Apple на основі Universal Scene Description (USD), ключова перевага полягає у можливості відображення складних сцен у доповненій реальності без використання додаткових плагінів. Підтримує такі дані як: анімацію, освітлення, структура сцени та матеріали, зберігаючи при цьому єдиний архів без стискання. Широко використовується в AR застосунках, мобільних візуалізацій та інтерактивних презентацій. Приклад внутрішнього USD файлу:

```

#usda 1.0
def Xform "Root" {
  def Mesh "Body" {
    asset inputs:diffuseTexture = @textures/body_color.png@
    asset inputs:normalTexture = @textures/body_normal.png@
    float3[] points = [
      (0.0, 0.0, 0.0),
      (1.0, 0.0, 0.0),
      (0.0, 1.0, 0.0)
    ]
    int[] faceVertexCounts = [3]
  }
}

```

```

        int[] faceVertexIndices = [0, 1, 2]
    }
}

```

Пояснення щодо структури USD файлу: #usda 1.0 – версія формату USDA це текстовий варіант USD, def Xform “Root” – оголошення кореневого вузла сцени, def Mesh “Body” – оголошення 3D-мешу, asset inputs:diffuseTexture – посилання на текстуру, float3[] points – список вершин, faceVertexCounts – кількість вершин в кожній грані, faceVertexIndices – індекси вершин. Формат USDZ є контейнером, що об’єднує один або кілька USD-файлів та пов’язані текстури, матеріали, анімації у єдиний архів без стиснення. порівнюючи з OBJ, USDZ не є текстовим форматом, повний структурований пакет, оптимізований для AR візуалізації.

3) Формат glTF (GL Transmission Format) оптимізований для швидкого завантаження та відображення [99] у веб-середовищах, підтримує PBR-матеріали (physically based rendering), анімацію, скелетну деформацію, камери та інші елементи сцени. Структура glTF складається з JSON-опису сцени та окремих бінарних ресурсів (геометрія, текстури), завдяки цьому формат забезпечує баланс між якістю та продуктивністю. Приклад glTF файлу спрощеної моделі трикутника в додатку Г. Пояснення щодо структури glTF: asset - версія glTF, генератор, інструмент експорту, scenes - опис сцен, nodes - ієрархія об’єктів, кожен вузол може містити трансформації, камери, світло, меш. meshes – описує геометрію, primitives - окремі частини мешу (трикутники, лінії, точки), attributes - посилання на дані вершини (position - координати, normal - нормалі, texcoord_0 - UV координати, color_0 - кольори вершин), indices - індекси вершин для побудови трикутників, buffers - бінарні дані, bufferViews - вказується, яка частина бінарного буфера містить дані, accessors - описує тип даних. Формат glTF є сучасним відкритим стандартом для обміну 3D даними, розробленим Khronos Group. Він використовує JSON-структуру для опису сцени та окремий бінарний буфер для геометрії, що

забезпечує компактність і високу швидкість завантаження, порівнюючи з форматами OBJ, glTF підтримує PBR-матеріали, анімацію та ієрархію вузлів.

4) формат GLB — це бінарна версія glTF, яка містить усі дані (геометрію, матеріали, текстури) в одному файлі, що робить GLB компактним, зручним для передачі та ідеальним для веб-публікацій. Порівнюючи з glTF, формат GLB не потребує окремих ресурсів, що спрощує інтеграцію у AR-застосунки та онлайн-переглядачі. Платформа Sktechfab та інші ресурси з великим масивом 3D моделей пропонують GLB у кількох варіантах текстур — наприклад, 4K та 1K.

- 4K – використовується для візуалізації з високою якістю та важливістю деталізації поверхні
- 1K – використовується для швидкого завантаження та оптимізований для мобільних пристроїв, особливо з низькими технічними характеристиками

У дослідженні було використано формат 3D моделей GLB з варіантом текстур 1K. В таблиці 4.4, зроблено порівняння форматів OBJ, USDZ, glTF, GLB:

Таблиця 4.4.

Характеристика форматів 3D-моделей

Формат	OBJ	USDZ	glTF	GLB
Тип структури	Текстовий	Архів без стиснення	JSON+бінарні ресурси	Єдиний бінарний файл
Підтримка анімації	Ні	Так	Так	Так
Оптимізація для веб	Низька	Середня	Висока	Дуже висока
Сценарії використання	Архівування геометрії, 3D сканування, CAD експорт	AR візуалізація, мобільні застосунки, презентації	Веб-візуалізація, інтерактивні моделі, VR та AR	Онлайн публікації, мобільні додатки, підтримка VR та AR

Підтримка 3D-редакторів	Дуже висока. Blender, 3ds Max, Cinema 4D, SketchUp та ін.	Обмежена. Повноцінна підтримка тільки в Apple Reality Composer. З плагінами для інших редакторів	Дуже висока. Blender, 3ds Max, Cinema 4D, SketchUp, Unity, Unreal Engine та ін.	Дуже висока. Blender, 3ds Max, Cinema 4D, SketchUp, Unity, Unreal Engine та ін.
Підтримка веб	WebGL бібліотеки (Three.js, Babylon.js)	Підтримка в екосистемі Apple: Safari. WebGL бібліотеки (Three.js, Babylon.js)	Максимальна підтримка. Ethree.js, Babylon.js, PlayCanvas, WebXR, Sketchfab, Google Model Viewer. Оптимізований для WebGL/WebXR.	Максимальна оптимізація для веб-платформ: швидке завантаження, без потреби у зовнішніх ресурсах. Підтримка всіх основних WebGL/WebXR рушіїв.

Статистика та затінення 3D моделей наведено у таблиці 4.5. Чим більша сітка, тим вища геометрична деталізація об'єкта, що робить плавніші поверхні, точніші контури, краща передача анатомічних структур, чим вища кількість вершин, тим точніше передаються вигини, краще працюють анімації та плавніші переходи між поверхнями, але при таких умовах стає вищою складність обчислення для GPU, WebAR рушію, мобільного пристрою, може слугувати зменшенням FPS (frame per second), більше часу для завантаження 3D моделі.

Таблиця 4.5.

Статистика та затінення використаних 3D моделей

Відомості про сітку					
Параметри	Травна сист.	Будова зуба	Зовнішня будова зуба	Будова шлунка	Травні залози
Трикутники	455 406	26 012	57 008	17 200	35 658
Вершини	254 357	14 734	28 875	9 028	18 958
Налашт. УФ0	Так	Так	Так	Так	Так
Налашт. УФ1	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
Кольори вершин	Ні	Ні	Так	Ні	Ні
Ідентиф.матеріалів	28	1	1	1	5
Відомості про текстуру					
Альбедо	26	1	1	1	5
Нормалі	24	1	1	1	5
Дзеркальний/металевий	6	1	-	-	5
Перекриття	-	1	-	-	
Відомості про сцену - вузли	93	7	8	10	23

Пояснення до параметрів:

- налаштування УФ0 (UV0) - присутність основного UV каналу, що використовується для накладання текстур;
- налаштування УФ1 (UV1) - використання lighmap текстур або складних PBR;
- кольори вершин - присутність vertex color даних;
- альбедо - зовнішній вигляд поверхні без урахування освітлення
- Нормалі - відповідає за візуальну якість
- Дзеркальний/металевий - використання PBR матеріалів
- Перекриття - використання комбінованої карти;
- Вузли - структурні елементи 3D сцени.

Першим тригером обрано зображення - «Мал. 24.2. Будова травної системи» з параграфа «§24. Будова та функції травної системи». Тригер створений саме функцією знімок екрана, оскільки фотографія може містити так звані артефакти»: відблиск, шум, викривлення, нерівномірне освітлення, розмиття, для тригера важливо дрібні елементи інтерфейсу, кольорові маркери, структуру верстки, знімок екрана надійніший для тригерів які залежать від точного кольору чи контрасту. Функція знімка екрана не змінює пропорції, кути, співвідношення сторін та розміри елементів, що є важливим для комп'ютерного зору. Цифрові копії інтерфейсу мають вищу точність для автоматичного аналізу від зробленої

фотографії. На рисунку 4.12, зображено тригер будови травної системи людини та його 3D модель:

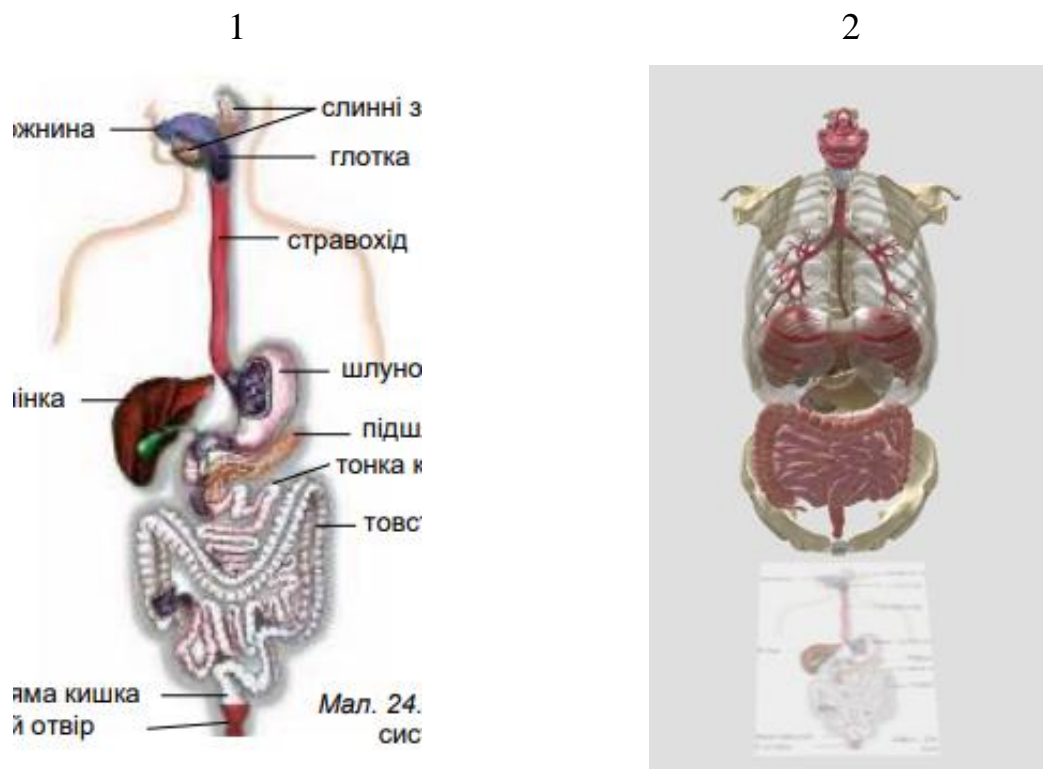


Рис. 4.12. Малюнок-тригер та його 3D модель

З лівої сторони під номером «1» - це тригер з підручника, під номером «2» вигляд накладеної 3D моделі в середовищі WebAR, модель розміщена перпендикулярно до малюнку. На 3D моделі зображено стравохід, діафрагму, підшлункову залозу, шлунок, тонку та товсту кишки, таз. Розмір файлу 24 МБ,

формат .glb, розмір тригера 73.9 КБ, роздільна здатність 191x323. Застосована модель є геометрично деталізованою, містить 1 UV каналу, 28 матеріалів та набір PBR текстур, що підвищує реалістичність моделі, а відсутність другого UV каналу забезпечує зменшене навантаження на WebAR рушій. Дані 3D об'єкта на тригері в середовищі платформи відображаються з допомогою осей "X, Y, Z": положення = "39, 57, 104", масштаб = "1.5, 1.5, 1.5", поворот = "-90, 0, 0". Тригер з високою деталізацією і підходить для використання в 3D сцені, система успішно розпізнала фотографію (рис. 4.13.).

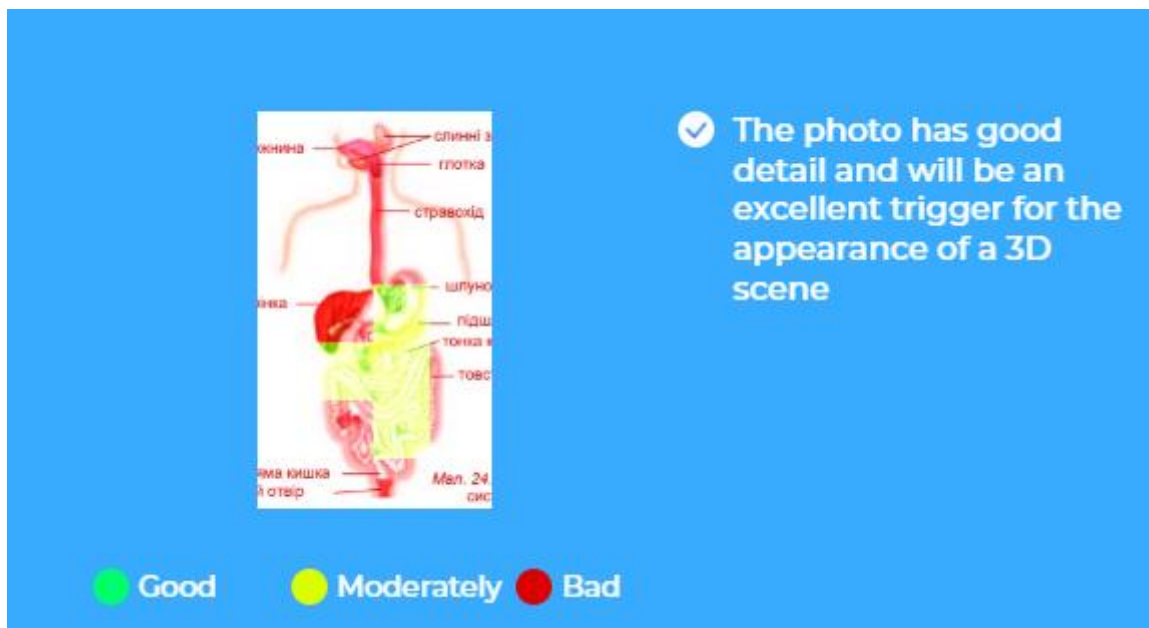


Рис. 4.13. Аналіз малюнку «Будова травної системи»

Наступні тригери з параграфа «§25. Процеси механічної та біохімічної обробки їжі в ротовій порожнині», малюнок «25.2 Будова зуба». На 3D моделі зображено емаль, дентин, пульпа, шийка, корінь, цемент. Дозволяє розглянути будову зуба у тривимірному форматі, збільшуючи чи зменшуючи модель, крутити довкола осі, для значного розуміння просторових взаємозв'язків між анатомічними елементами (рис. 4.14.).

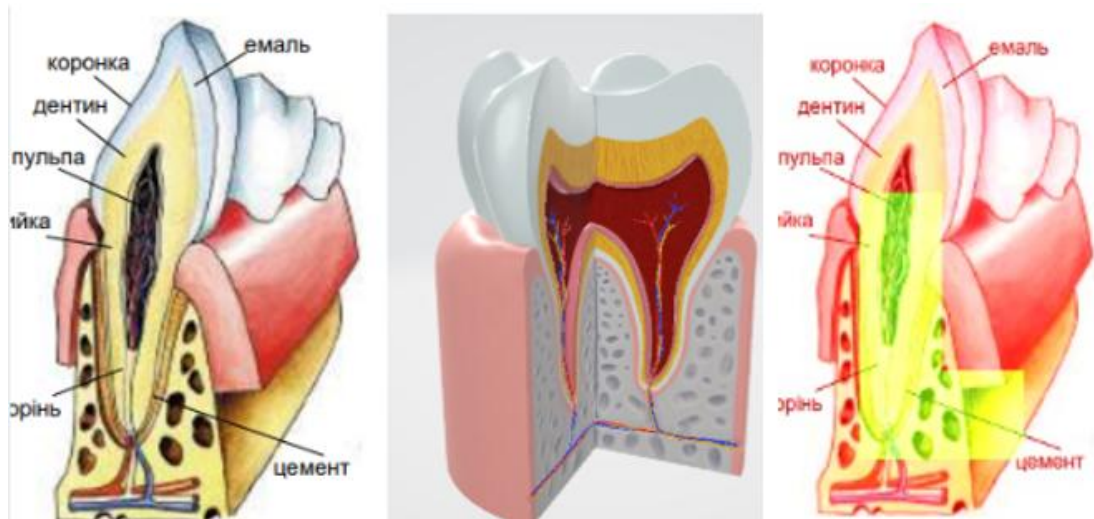


Рис. 4.14. Будова зуба – малюнок, 3D модель та аналіз зображення

Формат 3D моделі .glb, розмір файлу 10 069 КБ, розмір 2D тригера 95.9 КБ, роздільна здатність 204 x 290. Застосована модель середнього рівня полігональності, що свідчить про легке навантаження на графічний рушій, оптимальний для WebAR середовища. Результат аналізу зображення для використання тригера позитивний та може бути використаний для 3D сцени. Дані об'єкта в AR середовищі платформи: положення = “50, 53, 46”, масштаб = “1.4, 1.4, 1.4”, поворот = “-90, 43.63, 0.68”.

Наступним 2D тригером застосовано малюнок «26.3 Зовнішня будова (А) і розміщення зубів на щелепах (Б): 1 - різці; 2 - ікла; 3 - малі кутні; 4 - великі кутні» (рис. 4.15.). Якість тригера ідеальна для зчитування та легко може бути використана в AR сцені.

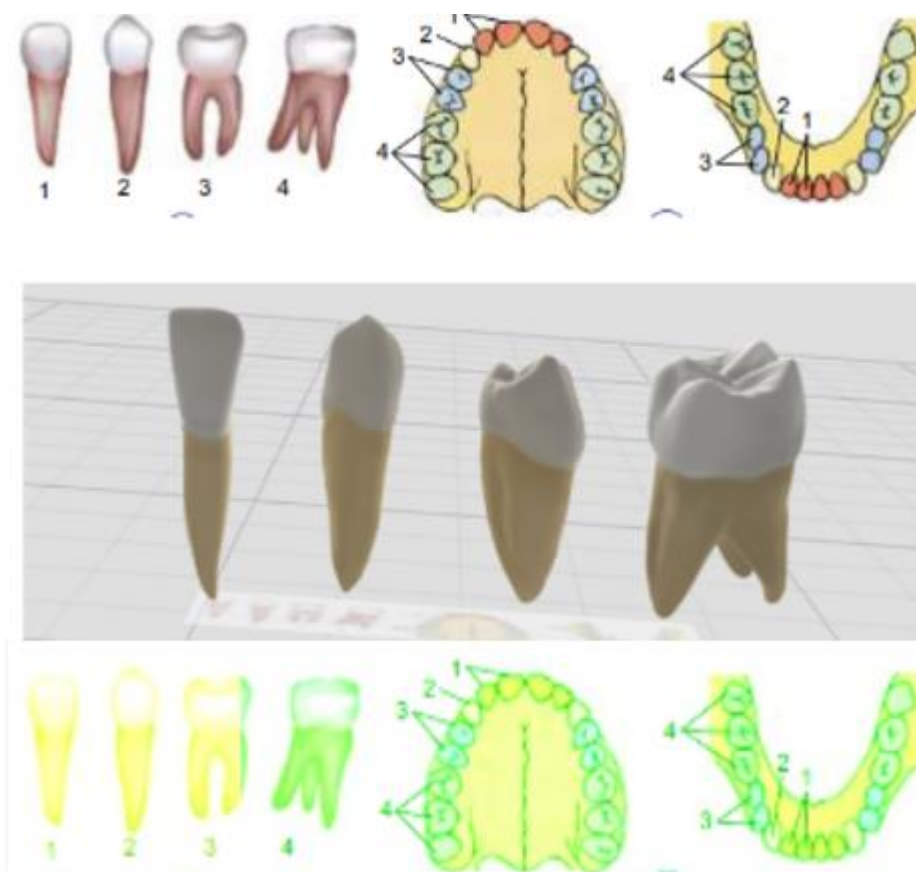


Рис. 4.15. Зовнішня будова зубів – малюнок, 3D-модель, аналіз зображення

2D тригер розташований по цілій ширині підручника, тому для кращого відображення 3D об'єктів було застосовано сцену на всю поверхню тригера з кількох моделей. Формат чотирьох 3D моделей - .glb, розміри файлів від 1 908 КБ до 2853 КБ, розмір 2D тригера 82.5 КБ, роздільна здатність 513x130. Модель складається з чотирьох 3D об'єктів, завантажених окремо та зіставлених в один цілий об'єкт, відповідно параметри осей будуть різними для кожного з чотирьох об'єктів (табл. 4.6.).

Таблиця 4.6.

Позиціонування об'єктів в AR-середовищі

Параметр/Позиція	X	Y	Z
Положення	4/14/42/67	323/299/347/-323	-193/-130/-11/229
Масштаб	1	1	1

Поворот	-69.3/-74.6/- 100/79.58	0/0/0/0	0/0/0/0
---------	----------------------------	---------	---------

Моделі середньо-високої полігональності, що забезпечують достатню деталізацію анатомічної форми зубів включно з нерівностями поверхні та плавними переходами, моделі не створюють надмірного навантаження на пристрої і є оптимальними для використання в AR середовищі. Наявність vertex color покращує деталізацію моделей.

Наступними тригерами будуть застосовані з параграфу «§26. Ковтання їжі. Процеси травлення в шлунку» малюнок «26.2. Будова шлунка». На 3D моделі зображено такі елементи: дно, м'язова оболонка, серозна оболонка, тіло, складки слизової оболонки, сфінктер (рис. 4.16.).

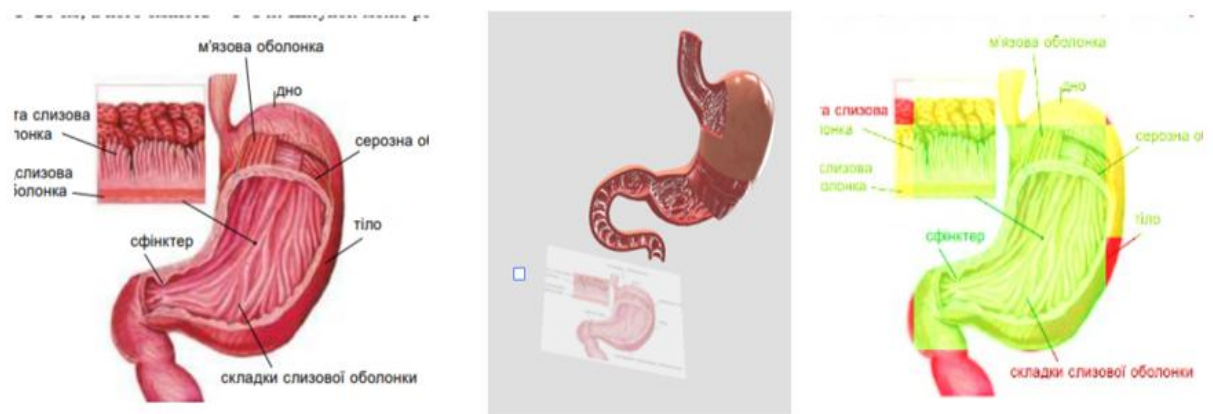


Рис. 4.16. Будова шлунка – малюнок, 3D-модель, аналіз зображення

Формат 3D моделі - .glb, розмір файлу 9 159 КБ, розмір 2D тригера 113 КБ, роздільна здатність 354x307. Полігональність моделі є помірною, але достатньо точною для відображення детальної анатомічної структури шлунку, такий рівень деталізації [100]. забезпечує хорошу візуальну складову. Система розпізнала тригер дуже високо, та легко, 3d модель шлунка є добре оптимізованою для використання у WebAR середовищі та придатна для інтерактивних навчальних сцен та візуалізацій. Дані 3d моделі в WebAR Studio

середовищі: положення = “60, 54, 57”, масштаб = “1, 1, 1”, поворот = “-74.3, 79.4, 0”

Наступна модель застосована для параграфа «§27. Процеси травлення в кишці. Виведення з організму неперетравлених решток їжі», тригером слугує малюнок «27.2. Зв'язок травних залоз із дванадцятипалою кишкою». На 3d моделі зображені такі елементи як: печінка, жовчний міхур, загальна жовчна протока печінки, протока підшлункової залози, селезінка. Формат моделі - .glb, розмір моделі 21 414 КБ, розмір тригера 91.6 КБ, роздільна здатність тригера 416 x 201. Модель має середню полігональну структуру, використовується кілька матеріалів та текстур для реалістичного відображення поверхні органів (рис. 4.17.).



Рис. 4.17. Зв'язок травних залоз із дванадцятипалою кишкою – малюнок, 3D-модель, аналіз зображення

Більша частина тригера відповідає статусу зчитування «Good», що сприяє легкій детекції з камери мобільного пристрою. Дані на основі позиціонування в середовищі платформи: положення = “75, 42, 59”, масштаб = “1.3, 1.3, 1.3”, поворот = “119.7, 15.22, 180”.

4.2.4. Застосування штучного інтелекту для створення 3D моделей та навчальних відео

Застосування штучного інтелекту для створення 3d об'єктів чи відео це один з перспективних напрямів розвитку сучасних цифрових технологій який варто застосувати в навчальному процесі та створенню навчального контенту. Створення моделей з будь-яких 2D зображень чи тексту дозволяє використати інтерактивні об'єкти для освітньої складової, отримати 3d моделі яких не існує в жодних базах та онлайн бібліотеках. Для дослідження обрано малюнок «24.3. Оболонки травного каналу: 1 – слизова; 2 – підслизова; 3 – м'язова; 4 – серозна». Створення нової 3d моделі з зображення виконалось на платформі автоматичної генерації 3D моделей Meshy AI [101], на рисунку 4.18, показано 2d зображення з підручника та готову створену модель:

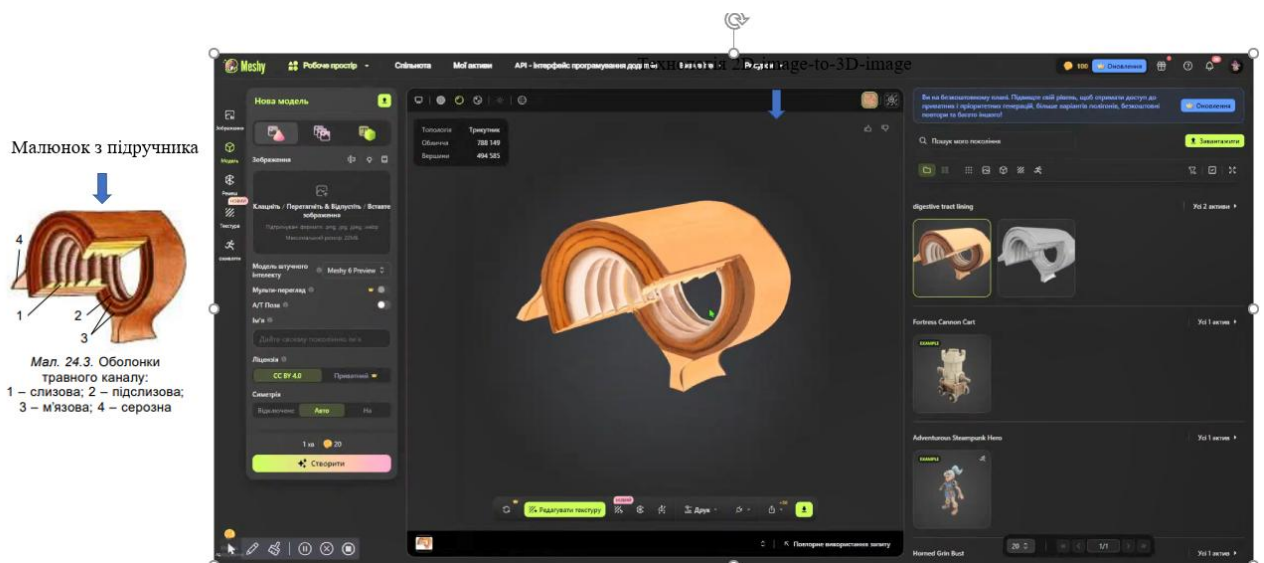


Рис. 4.18. Згенерована 3D-модель з допомогою ШІ (MeshyAI)

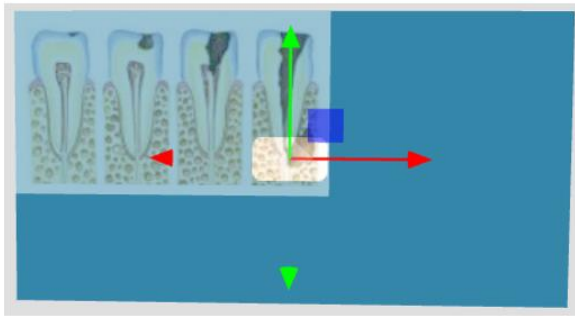
Отримано якісну модель готову для використання, платформа підтримує різні види редагування створеної моделі: змінити стиль (реалістичний, скульптурний), підтримка великої кількості розширення файлів (FBX, OBJ, STL, BLEND, USDZ, інші), застосування анімацій.

Для більшої інтерактивності в дослідженні створено відео з допомогою штучного інтелекту на платформі Invideo AI [102]. Початкова умова створення

відео це промпт [103], з допомогою штучного інтелекту створена покрокова інструкція:

“Generate an educational scientific video, dedicated to the visualization of dental caries development from early enamel demineralization to pulp inflammation. All elements of the video, including narration, on-screen text, subtitles, annotations, diagrams, and labels, must be presented exclusively in the Ukrainian language. The video should target school, while emphasizing the importance of early diagnosis and preventive measures. The video structure should sequentially include visualization of healthy tooth anatomy; illustration of the initial “white spot” stage with reversible enamel demineralization; gradual progression of carious lesions within the enamel; penetration of the lesion into dentin with corresponding functional consequences; involvement of the dental pulp and inflammatory processes resulting from delayed treatment; demonstration of preventive measures, oral hygiene practices, and clinical examination; and a final summary highlighting conclusions on prevention and early intervention. Audio narration must be calm, professional, and neutral in tone, using correct Ukrainian medical terminology. The technical specifications must include a minimum resolution of Full HD (1920×1080) with a 16:9 aspect ratio. Scientific and ethical constraints require strict adherence to medical accuracy.”

Після застосування текстового сценарію, створено відео тривалістю 43 секунди з назвою «Зупини карієс вчасно: від плями до пульпіту» та доступне для поширення створеним URL або завантаження на пристрій, файл у форматі MP4 з роздільною здатністю 1920*1080 (рис. 4.19.).



Вигляд в конструкторі WebAR

Вигляд на сторінці підручника

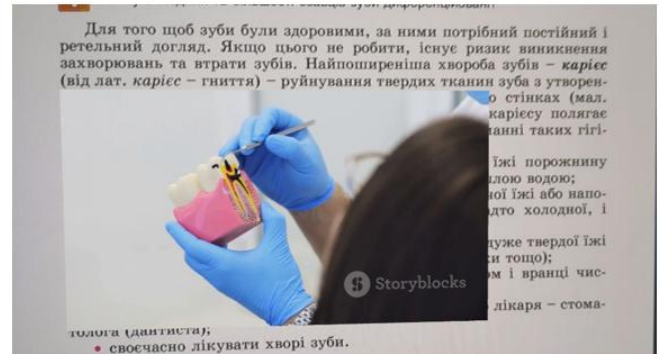


Рис. 4.19. Малюнок з підручника та накладене відео на тригер

Тригером слугує малюнок «26.4. Схема розвитку карієсу: від поверхневого до глибокого», відео розміщене поза межами малюнка для кращої візуалізації при зчитуванні камерою мобільного пристрою, в відео також застосовано аудіодоріжку, створену в Invideo AI одночасно з відеоматеріалом для кращого розуміння візуальної інформації.

4.3. Експериментальна перевірка ефективності впровадження AR-контенту

Було проведено дослідження з 1 грудня до 23 грудня 2025 року, для експериментальної перевірки ефективності впровадження контенту доповненої реальності сформовано вибірку з учнів двох 8-х класів ліцею №52 Львівської міської ради. У дослідженні та опитуванні взяли участь 38 учнів.

Дослідження проводилось у три етапи: перший етап - пояснення учням, що таке доповнена реальність та сфери її використання. Надана інформація про необхідність завантаження та встановлення додатку AR Viewer для кращого розпізнавання та відображення 3D об'єктів та проінструктовано з користування даним застосунком. Додатково надано інформацію про тему, де використані елементи доповненої реальності від 3D моделей до навчального

відео створеного штучним інтелектом. Другий етап – проведено підсумкове опитування у вигляді анкети, де учням потрібно було обрати найбільш оптимальні варіанти відповідей.

Анкета складалась з:

1. Чи використовували доповнену реальність (AR)?

- Мені відомо, що таке доповнена реальність;
- Використовували доповнену реальність для розваг;
- Використовували доповнену реальність для навчання;

З результату анкетування про досвід використання доповненої реальності 65% учнів відповіли, що вони чули або їм відомо про це, 32% зазначили, що використовували AR для розваг, 3% зазначили, що використовували AR саме для навчання (рис. 4.20.).

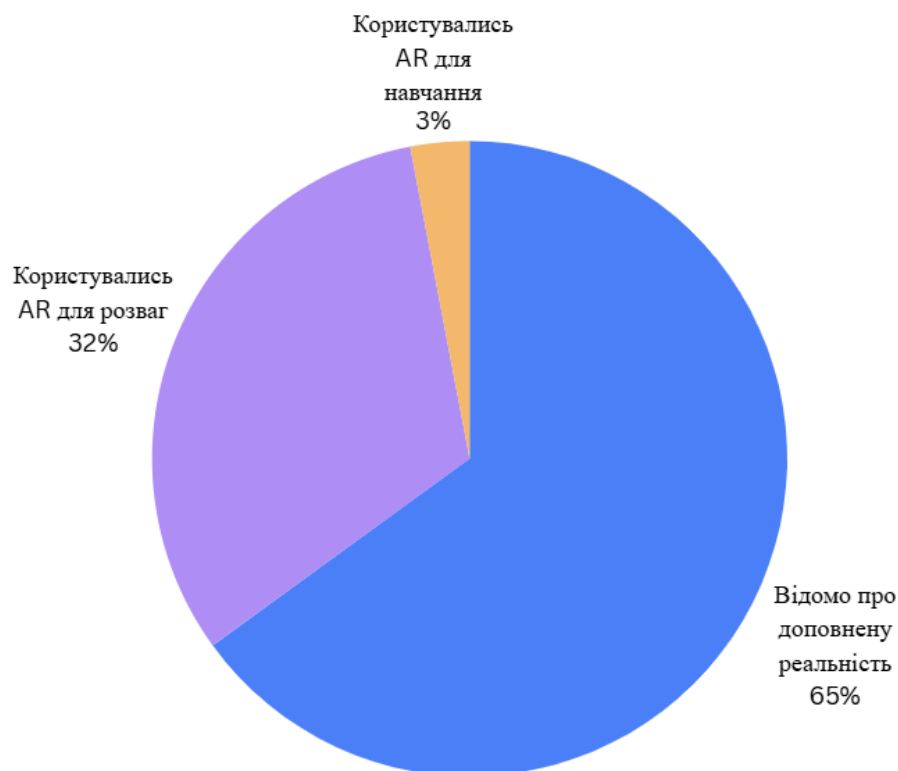


Рис. 4.20. Статистика про досвід використання AR

2. Чи легко запам'ятався матеріал, поданий з AR-моделями?

- Однозначно так;

- Частково;
- Скоріш ні;
- Не можу визначитись;

З результату анкетування щодо легшого запам'ятовування навчального матеріалу, поданого з 3D моделями в доповненій реальності, 32 учні відповіли, що матеріал запам'ятовувався легше, 2 учні відповіли “скоріш ні” та 4 учні не визначились з відповіддю (рис. 4.21.). З'ясувалось, що навчальний матеріал запам'ятовується легше, коли його відобразити в доповненій реальності.

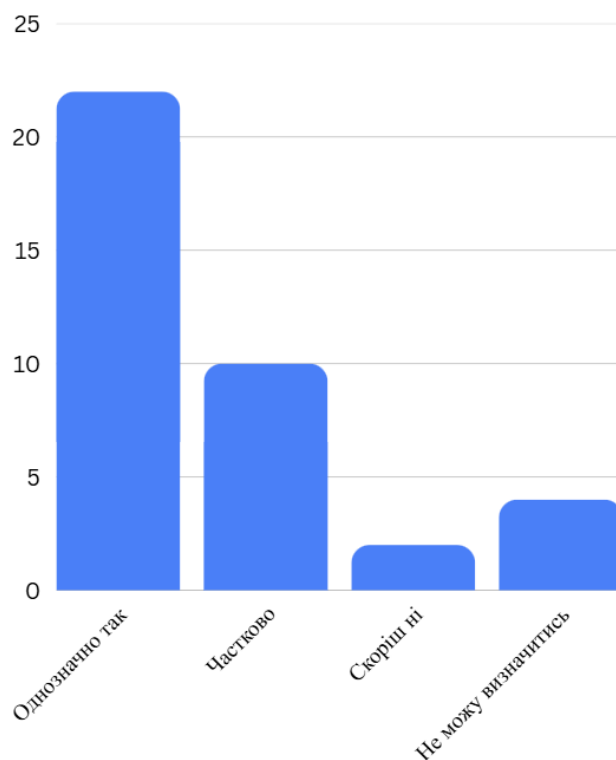


Рис. 4.21. Запам'ятовування поданого матеріалу з AR

3. Який спосіб вивчення навчального матеріалу для вас ефективніший?

- Тільки підручник;
- Підручник та 3D моделі в доповненій реальності;
- Підручник та навчальне відео в доповненій реальності.

Опитування про ефективність способу вивчення навчального матеріалу показує, що 21 учень обирають вивчення з додаванням 3D моделей до матеріалів підручника, 13 учнів обрали навчальні AR відео, та 4 учні зробили

вибір на користь звичайного вивчення з допомогою підручника без додаткових елементів доповненої реальності (рис. 4.22.).

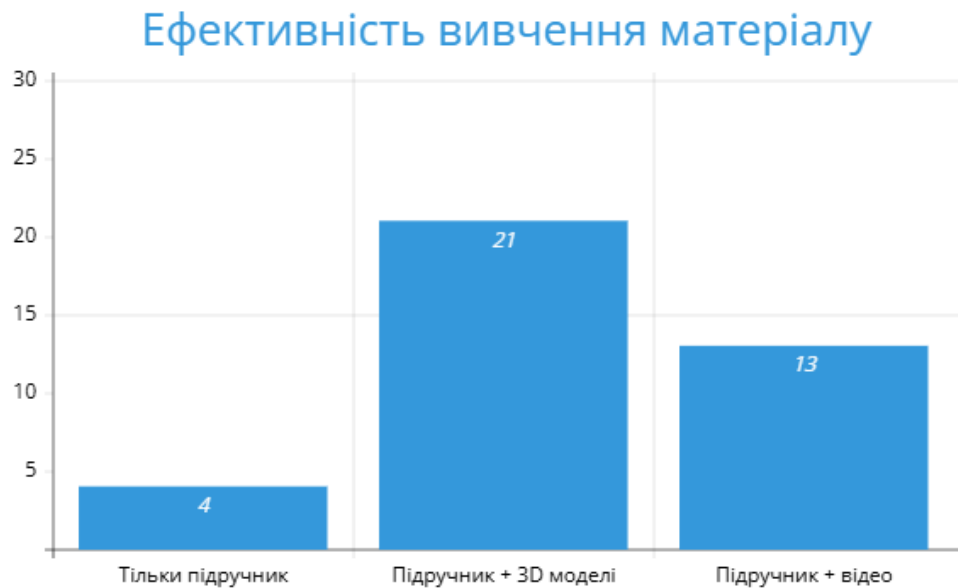


Рис. 4.22. Ефективність вивчення навчального матеріалу

4. Чи мотивує вас технологія AR вивчати біологію більше ніж традиційне навчання?

- Мотивує;
- Частково;
- Нейтрально;
- Не мотивує.

Виходячи з анкетування про мотивацію вивчення предмету Біологія, 73% учнів зацікавлені та мають більше бажання засвоєння матеріалу використовуючи доповнену реальність під час уроків, 17% відповіли, що вивчення для них не залежить від елементів AR, але це пізнавально, та 10% учнів яких не мотивує доповнена реальність до вивчення предмету (рис. 4.23.).

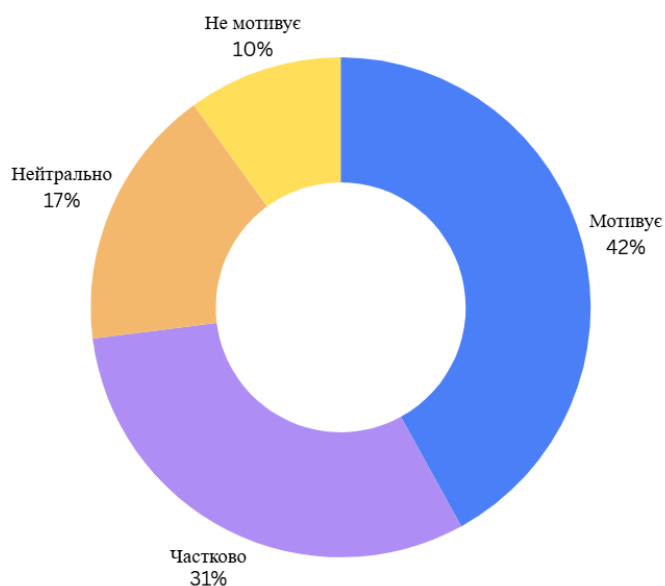


Рис. 4.23. Мотивація вивчати біологію

5. Які були технічні труднощі під час використання AR?

- Все працювало;
- Не відображалась 3D модель;
- Не відтворювалось відео або звук;
- Не запускалось AR;
- Затримка відгуку програми.

Підбиваючи підсумки з опитування (рис. 4.24.), у всіх учнів відображались 3D моделі, які були використані для дослідження, в 75% учнів не було жодних проблем з використанням доповненої реальності.

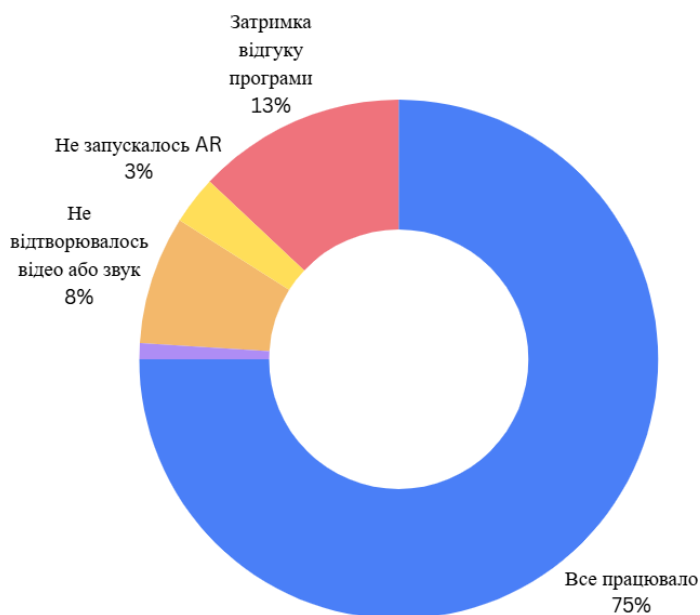


Рис. 4.24. Технічні труднощі під час використання AR

Під час використання в декількох учнів були технічні проблеми: чорний екран замість відео, але при відтворенні звуку і затримки у відображенні 3D моделей пов'язано зі старим програмним забезпеченням смартфона.

Висновок до 4 розділу

У розділі 4 виконано експериментальні дослідження інтеграції AR-контенту у навчальний підручник, створення нових 3D-моделей та використання штучного інтелекту (ШІ) для створення навчального контенту.

1. WebAR використовує веб-стандарти: WebXR, WebGL, WebRTC, HTML5, JavaScript, що підтримуються на версіях: Android, iOS, MacOS, ChromeBook, Linux, Windows. Це забезпечує доступність технології для більшості мобільних та стаціонарних платформ.

2. Проведений аналіз показав, що WebAR може бути інтегрований в онлайн-платформи для навчання Moodle та Google Classroom, для залучення потрібно використати посилання або застосувати iFrame: `<iframe src="https://projects.web-ar/webar" width="100%" height="500px" allow="camera"></iframe>`. Це

дозволяє інтегрувати AR-матеріали в навчальні курси не змінюючи моделі вже існуючих.

3. Створено прототип WebAR інтеграції, де включено: проблеми та цілі, аналіз чинних рішень та технологій, гіпотеза дослідження, експеримент та опитування, впровадження та збір даних, аналіз результатів, рекомендації для впровадження WebAR в освітній процес. Прототип підтверджує, що розроблена інформаційна технологія працює в реальному освітньому середовищі.

4. В AR-платформі для дослідження використано технологію «розпізнавання по фотографії» (Image tracking), що дозволило накладати готові 3D-моделі та малюнки тригери з підручника «Біологія 8 клас (Тема 4. Травна система)». Тригери було взято з електронного підручника за допомогою функції «знімок екрана», оскільки взятий тригер таким способом, система розпізнає легше ніж фотографію.

5. Сформовано схему обробки тригерного зображення в WebAR Studio: завантаження зображення, аналіз контрастності, детекція ключових точок, побудова дескрипторів, оцінка інформативності, формування карти ознак, присвоєння quality score. Проведений аналіз 5 алгоритмів виявлення ключових точок для зображення-тригера «стадія розвитку карієсу» з підручника. Для реалізації було використано Python-скрипт в середовищі розробки Microsoft Visual Studio, для кожного з алгоритмів та отримано дані кількості ключових точок: GFTT = 148, SIFT = 534, KAZE = 363, ORB = 506, FAST + BRIEF = 293/157, при мінімальній кількості в 44 точки для розпізнавання об'єкта. Це дозволило пояснити технічні аспекти та здатність відстежувати тригери у реальному часі.

7. Обрано формат “.GLB” для роботи з 3D моделями, як найкращий у зв'язку з якістю та легкістю використання, пріоритетність конвертованого формату це 1К – потребує менше системних вимог мобільних пристроїв (до 25 мб), та з хорошою якістю відтворення моделі. Готові моделі використовувались з ліцензією Creative Commons завантажені з онлайн

ресурсів Sketchfab та Free3D, що дозволяє використовувати моделі у своїх дослідженнях.

9. Для створення нових 3D моделей, використано Meshi AI, що дозволяє перетворювати 2D зображення чи текст в 3D моделі, автоматично генерує PBR-текстури, підтримує більшість форматів файлів для експорту внаслідок цього легко застосувати створені 3D моделі до свого проєкту, швидкість генерації моделей до 5 хвилин. Штучний інтелект в навчанні має такі цінності: автоматичний переклад відео, можливість миттєво поновлювати відео створені давно, створення розгалужених сценаріїв. Для навчальних відео використано Invideo AI, тривалість створеного відео дорівнює 30-45 секунд, платформа релевантна для створення освітнього матеріалу.

10. Проведено анкетування у формі опитування про досвід використання доповненої реальності у минулому, можливість запам'ятовування поданого матеріалу, ефективність вивчення теми, мотивація для вивчення біології, технічні труднощі під час використання AR-платформи на особистих мобільних пристроях. Це підтвердило дидактичну доцільність використання WebAR для вивчення біології.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення інформаційної технології створення навчального контенту з використанням доповненої реальності, що ґрунтується на інтегрованому застосуванні методів багатокритеріального аналізу для вибору AR-платформи та реалізації AR-контенту у структурі навчальних видань.

В дисертації отримано такі результати:

1. Проведена порівняльна характеристика традиційних та імерсивних технологій навчання, продемонструвала, що доповнена реальність має високий потенціал для розвитку просторового мислення, практичних навичок та підвищення залученості учнів чи студентів.

2. Описано переваги та проблеми впровадження технології доповненої реальності в навчальний процес, виявлені проблеми та суперечності стали підґрунтям для формування моделі прийняття рішень щодо вибору технологічної основи для розроблення AR-матеріалів.

3. Розроблено багатокритеріальну модель та алгоритм вибору платформи створення AR-контенту на основі методів АНР, ВММ та TOPSIS. Виконано структурування критеріїв за допомогою методу АНР, що дозволяє побудувати ієрархічну модель та встановити взаємозв'язки між метою дослідження, критеріями та альтернативами. Визначено вагові коефіцієнти критеріїв шляхом оптимізації експертних порівнянь методом ВММ. Сформовано матриці рішень із застосуванням методу TOPSIS, що забезпечило багатокритеріальне ранжування альтернативних платформ створення AR-контенту. Виконано підсумкове ранжування платформ, що дозволило визначити найбільш доцільну технологію для створення навчального AR-контенту, а саме WebAR.

4. Розроблено структурно-функціональну модель інформаційної технології створення навчального AR-контенту, визначено її архітектуру та алгоритм формування AR-об'єктів. Функціонування зазначених модулів забезпечило послідовний перехід від вхідних даних до вибору технологічної

платформи та створило основу для структурованого, обґрунтованого процесу розроблення освітнього продукту з використанням доповненої реальності.

5. Здійснено практичну реалізацію розробленої інформаційної технології на основі WebAR-платформи. Створено прототип Web-AR інтеграції в навчальне середовище, який продемонстрував доступність технології та здатність працювати в широкому спектрі пристроїв. Проаналізовано алгоритми розпізнавання – QR-код, фотографія, AR-360, геолокація та механізми виявлення ключових точок (ORB, SIFT, FAST+BRISK, GFTT), підтверджено, що розпізнавання малюнків-тригерів з підручника є високим.

6. Створено нові 3D-моделі з малюнків підручника з допомогою штучного інтелекту (ШІ) на платформі Meshy AI та застосовано до тригерів у дослідженні. Додатково використано промпт на платформі Invideo AI, та з допомогою ШІ створено інтерактивне відео тривалістю 43 секунди для малюнку з підручника та накладено на рисунок-тригер «схема розвитку карієсу: від поверхневого до глибокого».

12. На завершальному етапі для експериментальної перевірки ефективності впровадження контенту доповненої реальності було сформовано анкетування в якому взяли участь учні 8-х класів. Дослідження показало, що: 1) 73% доповнена реальність мотивує вивчати матеріал; 2) 55% обрали навчання з додаванням 3D-моделей до матеріалів підручника, 34% обрали AR-відео до навчальних матеріалів; 3) 57% учнів відповіли, що навчальний матеріал було легше запам'ятати, 26% частково з цим погодились; 4) в 75% опитуваних не було труднощів з використанням AR. Практична апробація на матеріалі підручника «Біологія 8 клас» засвідчила, що AR забезпечує значне підвищення наочності, зацікавленості та мотивації для засвоєння тем з навчальних дисциплін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rezende W.J., Albuquerque E.S., Ambrosio A.P. Use of AugmentedReality to Support Education - Creating a Mobile E-learning Tool and using it with anInquiry-based Approach. 2017;1: 100–107.
2. Гриб'юк О.О. Психофізіологічні підходи щодо проєктування комп'ютерно орієнтованих методичних систем дослідницького навчання учнів з педагогічно виваженим використанням імерсивних технологій. *Габітус. Науковий журнал. Випуск 39. Одеса: Видавничий дім «Гельветика», 2022. С. 95-103. DOI: <https://doi.org/10.32843/2663-5208.2022.39.17>*
3. Власенко В. М., Гриценко В. Г. Використання комп'ютерних технологій для забезпечення поелементарного контролю засвоєння навчального матеріалу з фізики [Електронний ресурс]. - URL: https://lib.iitta.gov.ua/707021/1/CHNU_2002_N34.pdf
4. Ребенко В. М., Рубець М. М. Використання сучасних комп'ютерних технологій у процесі професійного навчання [Електронний ресурс]. - URL: <http://erpub.chnpu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/2178/1/Використання%20сучасних%20комп%27ютерних%20технологій%20в%20п роцесі%20професійного%20навчання.pdf>
5. Стрілець С. І. Комп'ютерні технології навчання в освітньому процесі початкової школи [Електронний ресурс]. - URL: <https://epub.chnpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/4234/1/Комп'ютерні%20технології%20 навчання%20в%20освітньому%20процесі%20початкової%20школи.pdf>
6. Білер О. І. Технічні засоби у процесі навчання – сучасний погляд [Електронний ресурс]. – URL: https://scienceandeducation.pdpu.edu.ua/doc/2010/4_5_2010/32.pdf
7. Самойленко Є.Л. Використання сучасних комп'ютерних технологій у процесі підготовки майбутніх фахівців з фізичної культури та спорту [Електронний ресурс]. - URL: https://www.researchgate.net/publication/370419828_Vikoristanna_sucasnih_komp%27uternih_tehnologij_u_p rocesi_pidgotovki_majbutnih_fahivciv_z_fizicnoi_kulturi_ta_sportu

8. Кіяновська Н. Генезис поняття «інформаційно-комунікаційні технології» [Електронний ресурс]. - URL: <https://lib.iitta.gov.ua/706428/1/Kiyanovska2.pdf>
9. Гриценко А. Теоретичні основи використання мультимедіа технологій у процесі викладання історії. Науковий вісник МНУ імені В. О. Сухомлинського Випуск №2 (65). 2019. С. 69-73
10. Нагачевська Х. П. Сучасні підходи до викладання гуманітарних дисциплін у профільних класах із використанням інформаційних технологій навчання. Таврійський вісник освіти. Випуск № 1 (45). Ч. II. 2014. С. 205-210.
11. LearningApps [Електронний ресурс]. - URL: <https://learningapps.org/>
12. Mahhabah, A. M. An Analysis of Students' Perceptions About The Efficiency of Using of Zoom Cloud Meeting For Online Learning During Pandemic Covid 19. Postgraduate School, Universitas Islam Malang.
13. Що таке google meet? [Електронний ресурс]. - URL: <https://futurenow.com.ua/shho-take-google-meet-chym-osoblyvyj-tsej-videochat/>
14. Використання сервісу Google Meet за умов дистанційного навчання [Електронний ресурс]. - URL: <https://content.hneu.edu.ua/s/Elxzv-E6g>
15. What is Kahoot! and How Does it Work for Teachers? Tips & Tricks [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.techlearning.com/how-to/what-is-kahoot-and-how-does-it-work-for-teachers>
16. Медведська О.П., Зайченко А.О., Білоконь Д.В. LEARNINGAPPS як засіб активації виховної роботи з інформатики [Електронний ресурс]. - URL: https://fitu.kubg.edu.ua/images/stories/Departments/kitmd/Internet_conf_17.05.18/s1/1_Medvedska_Zaichenko_Bielokon.pdf
17. Аксайир, М., Аксайир, G. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>

18. Haoming W., Yuanhang Z., Xu An W., Xiaoyuan Y. An improved identity-based public audit protocol for cloud storage. *Heliyon*, 2024. DOI:10.1016/j.heliyon.2024.e36273.
19. Billinghamurst, M., Duenser, A. Augmented Reality in the Classroom. *Computer*, 45(7), 56–63. <https://doi.org/10.1109/MC.2012.111>
20. Ibanez, M.-B., Delgado-Kloos, C. Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.05.002>.
21. McDaniels M., Pfund C., Barnicle K. Creating dynamic learning communities in synchronous online courses: one approach from the Center for the Integration of Research, Teaching and Learning (CIRTL). *Online Learn.*, 20(1) (2016), pp. 110-129, DOI:10.24059/olj.v20i1.518.
22. Mather C., Guzys D., Saunders A., Tori K. Rapid transition to eLearning within a bachelor of nursing program: positive outcomes *Aust. Nurs. Midwifery J.*, 27 (1) (2020), p. 55.
23. Baugher, M., McGrew, D., Naslund, M., Carrara, E., & Norrman, K. Datagram Transport Layer Security (DTLS) Extension to Establish Keys for the Secure Real-time Transport Protocol (SRTP) (RFC 5764). Internet Engineering Task Force, 2010 [Електронний ресурс]. - URL: <https://data-tracker.ietf.org/doc/html/rfc5764>
24. Zhou H., Wentling S., Liu J. Certificate-based multi-copy cloud storage auditing supporting data dynamics. *Computers & Security*. DOI:10.1016/j.cose.2024.104096.
25. Huotari K., Hamari J. A definition for gamification: anchoring gamification in the service marketing literature. *Electronic Markets*, (2017), pp. 21-31, DOI:10.1007/s12525-015-0212-z.
26. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій в системах доповненої реальності. Поліграфія і видавнича справа. №1 (85). 2023. ст. 32-39. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-1-85-32-39.

27. Brennan D. 4 Virtual Reality for Vive, Rift, and Windows VR Compared [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.roadtovr.com/virtual-reality-desktop-compared-oculus-rift-htc-vive/>
28. Monaha, T. Virtual Reality for Collaborative E-learning, *Computers & Education*, 50 (4), pp. 1339-1353.
29. Thakral, S., Manhas, P. and Kumar C. Virtual Reality and M-Learning, *International Journal of Electronic Engineering Research*, Vol. 2, No. 5, pp. 659-661.
30. Azuma, R. Making Augmented Reality a Reality. In: *Proceedings Imaging and Applied Optics*. 2017 San Francisco, California, United States, OSA Publishing. DOI:10.1364/3D.2017.JTu1F.1.
31. Формування ключових компетентностей на уроках біології [Електронний ресурс]. - URL: <https://naurok.com.ua/formuvannya-klyuchovih-kompetentnostey-na-urokah-biologi-465046.html>
32. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій навчання. *Комп'ютерні технології друкарства*. №2 (52). 2024. ст. 194-201. DOI: 10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-194-201.
33. Нікітін В., Васюта С. Дослідження компонент цифрового навчального контенту. *Технологія і техніка друкарства*. №3 (85). 2024. ст. 101-109. DOI: 10.20535/2077-7264.3(85).2024.311476.
34. Khamula, O., Tymchenko, O., Vasiuta, S., Sosnovska, O., Dorosh, S. Development of Font Selection Method for Text Content in Immersive Technologies. *CEUR Workshop Proceedings*, Khmelnytskyi, June 28, pp. 112–128.
35. Phillips T., Ozogul G. Learning analytics research in relation to educational technology: capturing learning analytics contributions with bibliometric analysis. *TechTrends*, 64 (6), pp. 878-886, DOI:10.1007/s11528-020-00519-y.
36. Cheng K., Tsai C. A case study of immersive virtual field trips in an elementary classroom: students' learning experience and teacher-student interaction behaviors. *Comput. Educ.*, 140, Article 103600, DOI:10.1016/j.compedu.2019.103600.

37. Philippe S., Souchet A., Lameris P., Petridis P., Caporal J., Coldeboeuf G. Multimodal teaching, learning and training in virtual reality: a review and case study *Virtual Real. Intell. Hardw.*, 2 (5), pp. 421-442. DOI: 10.1016/j.vrih.2020.07.008.
38. Jaleniauskiene E., Kasperuniene J. Infographics in higher education: a scoping review *E-Learn. Digit. Media*, 20 (2), pp. 191-206, DOI:10.1177/20427530221107774.
39. Tymchenko, O., Khamula, O., Vasiuta, S., Sosnovska, O., Mlynko, O. A Comparison of Methods for Identifying the Priority Hierarchy of Influencing Factors. *Proceedings of the 3rd International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*, Khmelnytskyi, March 23-25. CEUR Workshop Proceedings 3156, CEUR-WS.org. pp. 228-237.
40. Breukelman M., Gosen M., Koole T. The workings of multiple principles in student-teacher interactions: Orientations to both mundane interaction and pedagogical context. *Linguistics and Education*, 76, DOI: 10.1016/j.linged.2023.101188.
41. Rahman R., Ahmad S., Hasim U. A study on gamification for higher education students' engagement towards education 4.0. *Intelligent and interactive computing: Proceedings of IIC 2018*, Springer, Singapore, pp. 491-502, DOI:10.1007/978-981-13-6031-2_5.
42. Vasiuta, S., Tymchenko, O., Kunanets, N., Sosnovska, O., Khamula, O. (2021) Synthesis and research of a model of factors of infographics compositional design with elements of visual communication. *CEUR Workshop Proceedings*, Khmelnytskyi, March 24-26, pp. 303–322.
43. Liang, F., Brunelli, M., Rezaei, J. Consistency issues in the Best Worst Method: Measurements and thresholds. *Omega*. 2020/2021 [Електронний ресурс]. -URL: https://www.researchgate.net/publication/338078269_Consistency_Issues_in_the_Best_Worst_Method_Measurements_and_Thresholds
44. Rezaei, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*. 2016. Vol. 64. P. 126–130 [Електронний

ресурс]. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305048315002479>

45. Best-Worst Method: A decade of evolution and future prospects. *Omega*. 2026 [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048326000356>

46. Нікітіна Л., Яценко І. Моделі та методи прийняття рішень: навчальний посібник / Л. Нікітіна, І. Яценко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. - 179 с.

47. Файнзільберг Л., Жуковська О., Якимчук В. Теорія прийняття рішень: навчальний посібник / Л. С. Файнзільберг, О. А. Жуковська, В. С. Якимчук. Київ: Освіта України, 2018. -246 с.

48. Hwang, CL., Yoon, K. Methods for Multiple Attribute Decision Making. In: Multiple Attribute Decision Making. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, vol 186. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3

49. OMG. Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0 / 2.0.2 [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/PDF>

50. ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Software, systems and enterprise — Architecture description [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.iso.org/standard/74393.html>

51. Lee, K. Augmented Reality in Education and Training. *TechTrends*, 56, 13–21. <https://doi.org/10.1007/s11528-012-0559-3>.

52. OpenCV is the world's biggest computer vision library [Електронний ресурс]. – URL: <https://forum.opencv.org/>

53. Vuforia. Vuforia Engine Developer Library [Електронний ресурс]. – URL: <https://developer.vuforia.com/library/>

54. ARToolKit. Open-source, multi platform augmented reality [Електронний ресурс]. – URL: <https://github.com/artoolkitx/artoolkitx/wiki>

55. Wikitude GmbH is the world's leading mobile augmented reality (AR) technology provider for smartphones, tablets and digital eyewear [Електронний ресурс]. – URL: <https://github.com/wikitude>
56. Blippar. Augmented reality creation made easy [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.blippar.com/blog/>
57. Kudan. Spatial Perception Technology Driving the Advancement of Physical AI [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.kudan.io/blog/>
58. Нікітін В., Васюта С. Технологія доповненої реальності в сучасному освітньому процесі/Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (06.02.-10.02. 2023р.). Львів: УАД. 2022. С.77.
59. Physics Playground. Forks of real-time physics engines [Електронний ресурс]. – URL: <https://github.com/physics-playground>
60. Гончарова Н. Використання ігрових технологій в STEM-освіті / Н. О. Гончарова // Нові технології навчання: наук.-метод. зб. / Інститут інноваційних технологій і змісту освіти МОН України. — К., 2016. — Вип. 88. частина 2. — С. 160–163.
61. Гончарова Н. Візуалізація навчальної інформації через використання технології до повненої реальності / Н. О. Гончарова // Інформаційні технології в культурі, мистецтві, освіті, науці, економіці та бізнесі: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 18–19 квітня 2019 року / М-во освіти і науки України; М-во культури України; Київ. нац. ун-т культури і мистецтв. — Київ: Видавничий центр КНУКіМ, 2019.
62. Grande, R., Albusac, J., Vallejo, D., Glez-Morcillo, C., & Castro-Schez, J. Performance evaluation and optimization of 3D models from low-cost 3D scanning technologies for virtual reality and metaverse e-commerce. Applied Sciences, 14 (14), 6037. <https://doi.org/10.3390/app14146037>.
63. EasyAR Spatial computing platform connecting everything [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.easyar.com/doc/en/>

64. Нікітін В., Васюта С. Дослідження використання технології доповненої реальності // Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (05.02.-9.02. 2024р.).

65. SmithersPira. The Future of European Printing to 2021 [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.smitherspira.com/industry-market-reports/printing/the-future-of-european-printing-to-2021>

66. Intel. Virtual reality vs. augmented reality vs. mixed reality: demystifying the virtual reality landscape [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/tech-tips-and-tricks/virtual-reality-vs-augmented-reality.html>

67. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в друкованих виданнях. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (March 7, 2025; Oxford, UK), 189–191. DOI 10.36074/logos-07.03.2025.038

68. Unity: develop, deploy, and grow [Електронний ресурс]. – URL: <https://learn.unity.com/tutorial/start-learning-unity>

69. VNTANA. What is mesh decimation and why is it vital for AR? [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.vntana.com/blog/what-is-mesh-decimation-and-why-is-it-vital-for-ar>

70. Milvus Labs. What common performance issues arise in AR applications? [Електронний ресурс]. URL: - <https://milvus.io/ai-quick-reference/what-common-performance-issues-arise-in-ar-applications>

71. PlugXR. Design & Deploy Immersive AR, VR, MR & WebXR Experiences Faster [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.plugin.com/creator>

72. MyWebAR by DEVAR - create augmented reality on web [Електронний ресурс]. – URL: <https://mywebar.com/features/>

73. Sketchfab - The best 3D viewer on the web [Електронний ресурс]. – URL: <https://sketchfab.com/3d-models/>

74. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в навчальних підручниках. *Імерсивні технології в освіті* : збірник

матеріалів V Міжнар.наук.-практ. конф., м. Київ, 29 квітня 2025 р. / за заг. ред. Носенко Ю.Г. Київ:ІЦО НАПН України, 2025. 121-126 с. DOI 10.33407/lib.NAES.id/eprint/745695.

75. Deshmukh, S., Anil, R. Art education and generative AI: An exploratory study in constructivist learning. *Creative Education*, 15(5), 780–794 [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=132790>

76. Huang, R. H. Generative AI in higher education: A global perspective of adoption and implementation. *Discover Education*, 2(1), 1–18 [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666920X24001516>

77. What is machine learning? [Електронний ресурс]. - URL: <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning>

78. Біологія 8 клас Балан 2025. [Електронний ресурс]. – URL: <https://shkola.in.ua/3265-biolohiia-8-klas-balan.html>

79. Нікітін В., Васюта С. Розробка навчальних матеріалів із застосуванням новітніх технологій. *Наукові записки*. №1 (70). 2025. ст. 213-217. DOI: 10.32403/1998-6912-2025-1-70-213-217.

80. Jason Wu, Xiaoyi Zhang, Jeffrey Nichols, and Jeffrey P. Bigham. 2021. Screen Parsing: Towards Reverse Engineering of UI Models from Screenshots. In Proceedings of the 2021 ACM Symposium on User Interface Software & Technology (UIST). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1–10.

81. Balntas, V.; Lenc, K.; Vedaldi, A.; Mikolajczyk, K. HPatches: A Benchmark and Evaluation of Handcrafted and Learned Local Descriptors. In Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA; 2017; pp. 3852–3861.

82. Fan, P.; Men, A.; Chen, M.; Yang, B. Color-SURF: A surf descriptor with local kernel color histograms. In Proceedings of the 2009 IEEE International

Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Beijing, China, 6–8 November 2009; pp. 726–730.

83. Vailaya, A.; Figueiredo, M.A.T.; Jain, A.K.; Zhang, H.-J. Image classification for content-based indexing. *IEEE Trans. Image Process.* 2001, 10, 117–130.

84. Ferrari, V.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. Simultaneous Object Recognition and Segmentation by Image Exploration. In *Toward Category-Level Object Recognition*; Lecture Notes in Computer Science; Ponce, J., Hebert, M., Schmid, C., Zisserman, A., Eds.; Springer: Berlin, Germany, 2006; Volume 4170.

85. Fan, B.; Kong, Q.; Wang, X.; Wang, Z.; Xiang, S.; Pan, C.; Fua, P. A performance evaluation of local features for image-based 3D reconstruction. *IEEE Trans. Image Process.* 2019, 28, 4774–4789.

86. Jakubović, A.; Velagić, J. Image Feature Matching and Object Detection Using Brute-Force Matchers. In Proceedings of the 2018 International Symposium ELMAR, Zadar, Croatia, 16–19 September 2018; pp. 83–86.

87. Sakai, Y.; Oda, T.; Ikeda, M.; Barolli, L. An Object Tracking System Based on SIFT and SURF Feature Extraction Methods. In Proceedings of the 2015 18th International Conference on Network-Based Information Systems, Taipei, Taiwan, 2–4 September 2015; pp. 561–565.

88. Cao, W.; Ling, Q.; Li, F.; Zheng, Q.; Wang, S. A keypoint-based fast object tracking algorithm. In Proceedings of the 2016 35th Chinese Control Conference (CCC), Chengdu, China, 27–29 July 2016; pp. 4102–4106.

89. Ignat, A.; Păvăloi, I. Keypoint Selection Algorithm for Palmprint Recognition with SURF. *Procedia Comput. Sci.* 2021, 192, 270–280.

90. Dixit, D.; Parashar, S.; Gondalia, A.; Sengupta, A.; Sivagami, M. Facial Identification using Haar Cascading with BRISK. In Proceedings of the 2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE), Vellore, India, 24–25 February 2020; pp. 1–7.

91. Sikder, J.; Datta, N.; Tripura, S.; Das, U.K. Emotion, Age and Gender Recognition using SURF, BRISK, M-SVM and Modified CNN. In Proceedings of

the 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 20–22 July 2022; pp. 1–6.

92. Lowe, D.G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Int. J. Comput.* 2004, 60, 91–110.

93. Rublee, E.; Rabaud, V.; Konolige, K.; Bradski, G. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 6–13 November 2011; pp. 2564–2571.

94. Leutenegger, S.; Chli, M.; Siegwart, R.Y. BRISK: Binary Robust invariant scalable keypoints. In Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, Barcelona, Spain, 6–13 November 2011; pp. 2548–2555.

95. Alcantarilla, P.F.; Bartoli, A.; Davison, A.J. KAZE Features. *In Computer Vision—ECCV 2012; Lecture Notes in Computer Science; Fitzgibbon, A., Lazebnik, S., Perona, P., Sato, Y., Schmid, C., Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; Volume 7577.*

96. Hutama, S. A., Nugroho, S., & Utomo, D. Features deletion on multiple objects recognition. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 14(2), 692–698. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v14i1.3461.

97. Visual Studio Code documentation [Electronic resource]. - URL: <https://code.visualstudio.com/docs>

98. GarageFarm. NET. 3D asset optimization: enhancing efficiency and maintaining quality. [Електронний ресурс]. -URL: <https://garagefarm.net/blog/3d-asset-optimization-enhancing-efficiency-and-maintaining-quality>

99. Boutsis, A. – M., Ioannidis, C., & Verykokou, S. Multi-resolution 3D rendering for high-performance web augmented reality. *Sensors (Basel)*, 23 (15), 6885. <https://doi.org/10.3390/s23156885>.

100. Wang, F. AR optimization strategies to build immersive and high-performance experiences. InAirSpace. [Електронний ресурс]. – URL: <https://inairspace.com/ja/blogs/learn-with-inair/ar-optimization-strategies-to-build-immersive-and-high-performance-experiences>

101. Meshy AI - The #1 AI 3D Model Generator [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.meshy.ai/uk/discover>

102. Invideo AI - Create videos without limits [Электронный ресурс]. – URL: <https://help.invideo.io/en/collections/15876627-prompting-on-invideo>

103. Prompt Engineering Guide [Electronic resource]. - URL: <https://www.promptingguide.ai/>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.

ПЕРЕЛІК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних та є науковими фаховими виданнями України:

1. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій в системах доповненої реальності. *Поліграфія і видавнича справа*. №1 (85). 2023. ст. 32-39. DOI: 10.32403/0554-4866-2023-1-85-32-39.

2. Нікітін В., Васюта С. Аналіз інформаційних технологій навчання. *Комп'ютерні технології друкарства*. №2 (52). 2024. ст. 194-201. DOI: 10.32403/2411-9210-2024-2-52-1-194-201

3. Нікітін В., Васюта С. Дослідження компонент цифрового навчального контенту. *Технологія і техніка друкарства*. №3 (85). 2024. ст. 101-109. DOI: 10.20535/2077-7264.3(85).2024.311476.

4. Нікітін В., Васюта С. Розробка навчальних матеріалів із застосуванням новітніх технологій. *Наукові записки*. №1 (70). 2025. ст. 213-217. DOI: 10.32403/1998-6912-2025-1-70-213-217.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Нікітін В., Васюта С. Технологія доповненої реальності в сучасному освітньому процесі/Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (06.02.-10.02. 2023р.). Львів: УАД. 2022. С.77.

6. Нікітін В., Васюта С. Дослідження використання технології доповненої реальності // Тези доповідей наук.-техн. конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів УАД (05.02.-9.02. 2024р.).

7. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в друкованих виданнях. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*, (March 7, 2025; Oxford, UK), 189–191. DOI 10.36074/logos-07.03.2025.038

8. Нікітін В., Васюта С. Використання технологій доповненої реальності в навчальних підручниках. Імерсивні технології в освіті : збірник матеріалів V Міжнар.наук.-практ. конф., м. Київ, 29 квітня 2025 р. / за заг. ред. Носенко Ю.Г. Київ : ЦО НАПН України, 2025. 121-126 с. DOI 10.33407/lib.NAES.id/eprint/ 745695

ДОДАТОК Б.**ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Результати роботи пройшли апробацію на:

- звітних науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів Української академії друкарства (Львів, 2023–2024);
- VIII International Scientific and Practical Conference «THEORETICAL AND EMPIRICAL SCIENTIFIC RESEARCH: CONCEPT AND TRENDS» Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (March 7, 2025; Oxford, UK);
- V Міжнар.наук.-практ. конф., м. Київ, 29 квітня 2025 р. / за заг. ред. Носенко Ю.Г. Київ : ІЦО НАПН України, 2025;

ДОДАТОК В.

ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ З ДОПОМОГОЮ PYTHON + OPENCV

1. Ініціалізація KAZE:

```

import os
import cv2
import numpy as np

# Завантаження зображення
img_path = "teeth.png"
img = cv2.imread(img_path, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)

# Ініціалізація KAZE
kaze = cv2.KAZE_create()

# Детекція ключових точок і дескрипторів
keypoints, descriptors = kaze.detectAndCompute(img, None)

kp_count = 0 if keypoints is None else len(keypoints)
print(f"Знайдено ключових точок: {kp_count}")

# Візуалізація
img_kp = cv2.drawKeypoints(
    img, keypoints, None,
    flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS
)

# Збереження результату в файл (додаємо суфікс _kaze_keypoints.png)
out_path = os.path.splitext(img_path)[0] + "_kaze_keypoints.png"
ok, buf = cv2.imencode('.png', img_kp)
if ok:
    with open(out_path, 'wb') as f:
        f.write(buf.tobytes())
    print(f"Збережено результат: {out_path}")
else:
    print("Не вдалося закодувати зображення для збереження.")

cv2.imshow("KAZE Keypoints", img_kp)
cv2.waitKey(0)
cv2.destroyAllWindows()

```

2. Ініціалізація GFTT

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#Завантаження зображення
img = cv2.imread("teeth.png")

```

```

if img is None:
    print("Не вдалося завантажити зображення!")
    exit()

#Перетворення в сіре
gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

#Застосування легкого розмиття, щоб зменшити шум
gray = cv2.GaussianBlur(gray, (5,5), 0)

#Налаштування GFTT (Shi-Tomasi)
corners = cv2.goodFeaturesToTrack(
    gray,
    maxCorners = 600,          # кількість точок для пошуку
    qualityLevel = 0.015,     # чим менший тим кращі точки
    minDistance = 7,         # мінімальна відстань між точками
    blockSize = 7,
    useHarrisDetector = False, # False = Shi-Tomasi, True = Harris
    k = 0.04
)

#Малюнок знайдених точок на кольоровому зображенні
if corners is not None:
    corners = corners.astype(np.int32)
    for corner in corners:
        x, y = corner.ravel()
        cv2.circle(img, (x, y), radius=3, color=(0, 255, 0),
        thickness=-1)

print(f"Кількість ключових точок: {len(corners)}")

#Display the result
cv2.imwrite('corners_detected.jpg', img)
print("Image saved as corners_detected.jpg")

```

3. Ініціалізація ORB:

```

import os
import sys
import cv2
import numpy as np

def main(image_path="teeth.png"):
    # Шлях відносно файлу
    base_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
    img_path = image_path if os.path.isabs(image_path) else
    os.path.join(base_dir, image_path)

    if not os.path.exists(img_path):

```

```

print(f"Файл або тека не знайдени: {img_path}")
sys.exit(1)

# Завантаження зображення (підтримка Unicode-шляхів через
imdecode)
try:
    with open(img_path, 'rb') as f:
        file_bytes = f.read()
        arr = np.frombuffer(file_bytes, dtype=np.uint8)
        img = cv2.imdecode(arr, cv2.IMREAD_GRAYSCALE)
except Exception as e:
    print(f"Помилка при читанні файлу: {img_path} -> {e}")
    sys.exit(1)

if img is None:
    print(f"Не вдалося завантажити зображення або файл
пошкоджений: {img_path}")
    sys.exit(1)

# Ініціалізація ORB
orb = cv2.ORB_create(
    nfeatures=1000,
    scaleFactor=1.2,
    nlevels=8,
    edgeThreshold=31,
    firstLevel=0,
    WTA_K=2,
    scoreType=cv2.ORB_HARRIS_SCORE,
    patchSize=31,
    fastThreshold=20,
)

# Детекція ключових точок і дескрипторів
keypoints, descriptors = orb.detectAndCompute(img, None)

kp_count = 0 if keypoints is None else len(keypoints)
print(f"Знайдено точок: {kp_count}")

if kp_count == 0:
    print("Ключові точки не знайдені. Перевірте якість зображення
або пороги ORB.")
    return

# Візуалізація – перетворення зображення в кольорове для
відображення
img_color = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_GRAY2BGR)
img_kp = cv2.drawKeypoints(

```

```

        img_color, keypoints, None,
flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS
    )

    # Збереження результату в файл (додаємо суфікс _keypoints.png)
    out_path = os.path.splitext(img_path)[0] + "_keypoints.png"
    ok, buf = cv2.imencode('.png', img_kp)
    if ok:
        with open(out_path, 'wb') as f:
            f.write(buf.tobytes())
        print(f"Збережено результат: {out_path}")
    else:
        print("Не вдалося закодувати зображення для збереження.")

    cv2.imshow("ORB Keypoints", img_kp)
    cv2.waitKey(0)
    cv2.destroyAllWindows()

if __name__ == "__main__":
    # Вибірково: дозволити передати інший шлях через аргументи
    командного рядка
    if len(sys.argv) > 1:
        main(sys.argv[1])
    else:
        main()

```

4. Ініціалізація FAST+BRIEF:

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Завантаження зображення
img_path = "teeth.png"
img = cv2.imread(img_path)
if img is None:
    print("Не вдалося завантажити зображення!")
    exit()

gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

# 2. Вибірково: розмиття для зменшення шуму
gray = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)

# 3. Детектор ключових точок (FAST - швидкий і добре працює з BRIEF)
fast = cv2.FastFeatureDetector_create(threshold=30) # чутливість - 30
keypoints = fast.detect(gray, None)

print(f"Знайдено ключових точок FAST: {len(keypoints)}")

```

```

# 4. BRIEF дескриптор
brief = cv2.xfeatures2d.BriefDescriptorExtractor_create(
    bytes=32,          # довжина дескриптора: 32
    use_orientation=True # True - враховує орієнтацію
)

# Обчислення дескрипторів тільки для знайдених ключових точок
keypoints_filtered, descriptors = brief.compute(gray, keypoints)

# Фільтрування точок, для яких вдалося обчислити дескриптори
print(f"Залишилось ключових точок з BRIEF дескрипторами:
{len(keypoints_filtered)}")
print(f"Розмір дескрипторів: {descriptors.shape if descriptors is not
None else 'None'}") # (N, 32) для bytes=32

# 5. Малюнок ключових точок на зображенні
img_with_kp = cv2.drawKeypoints(
    img,
    keypoints_filtered,
    None,
    color=(0, 255, 0), # зелений
    flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS # показує
розмір/орієнтацію
)

# 6. Вивід результату
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.imshow(cv2.cvtColor(img_with_kp, cv2.COLOR_BGR2RGB))
plt.title("Keypoints з FAST + BRIEF дескриптори")
plt.axis('off')
plt.show()

# Для збереження
cv2.imwrite("teeth_brief_result.jpg", img_with_kp)

```

5. Ініціалізація SIFT

```

import cv2
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# 1. Завантаження зображення
img_path = "teeth.png"
img = cv2.imread(img_path)
if img is None:
    print("Не вдалося завантажити зображення!")
    exit()

gray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

```

```

# 2. Розмиття для зменшення шуму
gray = cv2.GaussianBlur(gray, (5, 5), 0)

# 3. Ініціалізація SIFT
sift = cv2.SIFT_create(
    nfeatures=0,          # 0 = без обмеження, або N для топ-N кращих
                          # точок
    nOctaveLayers=3,     # кількість шарів на октаву (3 за
                          # замовчуванням)
    contrastThreshold=0.04, # поріг контрасту (вище → менше точок)
    edgeThreshold=10,     # поріг для відсіювання крайових відповідей
                          # (вище → більше точок)
    sigma=1.6           # початковий розмах Гаусса (1.6 за
                          # замовчуванням)
)

# 4. Виявлення ключових точок та дескрипторів
keypoints, descriptors = sift.detectAndCompute(gray, None)

# 5. Малюнок ключових точок на зображенні
# flags=DRAW_RICH_KEYPOINTS показує розмір/орієнтацію як кружечки з
# лініями
img_with_kp = cv2.drawKeypoints(
    img,
    keypoints,
    None,
    color=(0, 255, 0), # зелений
    flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS
)

# 6. Виведення кількості знайдених точок
print(f"Кількість ключових точок SIFT: {len(keypoints)}")

# 7. Результат
plt.figure(figsize=(12, 8))
plt.imshow(cv2.cvtColor(img_with_kp, cv2.COLOR_BGR2RGB))
plt.title("SIFT keypoints")
plt.axis('off')
plt.show()

# Збереження результату в файл
cv2.imwrite("teeth_sift_result.jpg")

```

ПРИКЛАД GITF ФАЙЛУ СПРОЩЕНОЇ МОДЕЛІ ТРИКУТНИКА

```
JSON
{
  "asset": {
    "version": "2.0",
    "generator": "ExampleGenerator"
  },
  "scenes": [
    { "nodes": [0] }
  ],
  "nodes": [
    { "mesh": 0 }
  ],
  "meshes": [
    {
      "primitives": [
        {
          "attributes": {
            "POSITION": 0
          },
          "indices": 1
        }
      ]
    }
  ],
  "buffers": [
    {
      "uri": "triangle.bin",
      "byteLength": 48
    }
  ],
  "bufferViews": [
    {
      "buffer": 0,
      "byteOffset": 0,
      "byteLength": 36,
      "target": 34962
    },
    {
      "buffer": 0,
      "byteOffset": 36,
      "byteLength": 12,
      "target": 34963
    }
  ],
}
```

```
"accessors": [  
  {  
    "bufferView": 0,  
    "componentType": 5126,  
    "count": 3,  
    "type": "VEC3"  
  },  
  {  
    "bufferView": 1,  
    "componentType": 5123,  
    "count": 3,  
    "type": "SCALAR"  
  }  
]  
}
```

```
"buffers": [  
  {  
    "uri": "triangle.bin",  
    "byteLength": 48  
  }  
],
```

```
"bufferViews": [  
  {  
    "buffer": 0,  
    "byteOffset": 0,  
    "byteLength": 36,  
    "target": 34962  
  },  
  {  
    "buffer": 0,  
    "byteOffset": 36,  
    "byteLength": 12,  
    "target": 34963  
  }  
],
```

```
"accessors": [  

```

```
{
  "bufferView": 0,
  "componentType": 5126,
  "count": 3,
  "type": "VEC3"
},
{
  "bufferView": 1,
  "componentType": 5123,
  "count": 3,
  "type": "SCALAR"
}
]
}
```

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ



Львівська міська рада
Департамент освіти та культури
Ліцей №52 Львівської міської ради
79 007, Львів, вул. Гоголя, 17, тел.: (032) 255 52 00, 52school@ukr.net

27.01.2026 № 01-16/20

на № _____ від _____

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Я, представник в особі директорки Ліцею №52 Львівської міської ради Світлани МАТИС даним актом стверджую впровадження та використання рекомендацій, що стосуються технологічних особливостей використання доповненої реальності для підручника Біологія 8 клас «Тема 4. Травна система. Процеси метаболізму» під час проведення уроків в період з 1 грудня 2025 року по 23 грудня 2025 року в Ліцеї №52 Львівської міської ради.

Розроблені дисертантом методи та технології створення доповненої реальності для навчальних матеріалів є науковими результатами дисертаційної роботи Нікітіна В.О. дають можливість візуалізації складних понять, підвищення мотивації учнів до навчання. Отримані результати свідчать про підвищення рівня засвоєння матеріалу. Запропонована методика відповідає принципам компетентнісного підходу.



Світлана МАТИС

ДОДАТОК Є.

ДОВІДКА ВПРОВАДЖЕННЯ В ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС

Проректор з науково-педагогічної роботи
Української академії друкарства



Угрин Я.М.

06 2024 р.

Д О В І Д К А

про використання в освітньому процесі
результатів дисертації Нікітіна В. О.

**«Інформаційна технологія створення навчального контенту з
використанням доповненої реальності»**

Підготовка фахівців в Українській академії друкарства орієнтована на сучасний стан розвитку цифрових технологій, мультимедійних засобів комунікації та впровадження інноваційних підходів до створення електронних видань і навчальних ресурсів. В освітньому процесі значна увага приділяється застосуванню технологій, що сприяють підвищенню зацікавленості здобувачів освіти до навчального матеріалу, зокрема використанню імерсивних технологій та засобів доповненої реальності.

Одні з провідних дисциплін освітньо-професійних програм «Мультимедійні видавничо-поліграфічні технології» та «Технологія електронних мультимедійних видань» передбачають вивчення принципів створення інтерактивного навчального контенту, моделювання процесів подання текстової, графічної та мультимедійної інформації з використанням сучасних інструментів. Це знайшло відображення у робочих навчальних програмах і методичних матеріалах для лекційних та практичних занять студентів освітніх ступенів «бакалавр» та «магістр». Матеріали дисертаційного

дослідження використовуються під час викладання дисциплін «Технологія електронних мультимедійних видань», «Проектування електронного мультимедійного видання», «Імерсивні технології» та «Дизайн контенту».

Під час вивчення зазначених дисциплін застосовуються моделі, методи та алгоритми проектування навчальних матеріалів із використанням доповненої реальності, розроблені у дисертаційній роботі, а саме: принципи поєднання традиційного навчального контенту з елементами доповненої реальності; моделі підвищення рівня залученості та зацікавленості студентів до сприйняття навчальної інформації; методи візуалізації складних навчальних об'єктів через AR-середовище; підходи до структурування навчального матеріалу з урахуванням особливостей сприйняття інформації в імерсивному середовищі.

Застосування результатів дослідження сприяє підвищенню ефективності засвоєння навчального матеріалу, формуванню практичних навичок створення сучасного інтерактивного контенту та розвитку професійних компетентностей майбутніх фахівців у сфері електронних мультимедійних видань.

Матеріали дисертації також використовуються під час визначення тематики та змісту кваліфікаційних робіт студентів технологічних спеціальностей.

Завідувач кафедри інформаційних
мультимедійних технологій
д.т.н., професор



В. І. Сабат