

Міністерство освіти і науки України

**Поліграфічні, мультимедійні та web-технології
у цифровому середовищі**

Том 1

Колективна монографія

Харків 2026

УДК 004.9

П50

Рекомендовано до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (протокол № 6 від 21 травня 2026 р.)

Рецензенти:

О. І. Пушкар, доктор економічних наук, професор, ХНЕУ ім. Семе́на Кузне́ця;

О. А. Левтеров, доктор технічних наук, с.н.с., професор, НУЦЗУ

П50 Поліграфічні, мультимедійні та web-технології у цифровому середовищі: колективна монографія (для спеціальностей G20 Видавництва та поліграфія, F3 Комп'ютерні науки) / редкол.: О. В. Вовк, І. Б. Чеботарьова, Ж.В. Дейнеко. Харків : Друкарня Мадрид, 2026. Т. 1. 391 с.

У монографії розглянуті питання, присвячені технічним і технологічним інноваціям у виробництві друкованої продукції і в пакувальному виробництві, інформаційним, мультимедійним та web-технологіям, розробці інтелектуальних систем, використанню штучного інтелекту у видавничій діяльності, обробці графіки та управлінню кольором. Розглянуто також питання маркетингу і реклами у поліграфії, особливості медіакомунікацій та використання нових методів навчання фахівців для видавничо-поліграфічної галузі, зв'язок навчального процесу з виробництвом.

Рекомендується викладачам, науковцям, бізнесменам, фахівцям видавничо-поліграфічної та рекламної галузей, розробникам мультимедійних інформаційних продуктів, аспірантам і студентам.

УДК 004.9

ISBN 978-617-8254-58-2
DOI: 10.30837/PMW.2026.T1

© Вовк О. В., Чеботарьова І. Б.,
Дейнеко Ж. В., 2026
© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2026

ЗМІСТ

	ВСТУП	5
1	<i>Хламов С.В.</i> МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ВИДАНЬ У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ	6
2	<i>Пановик У.П.</i> КОМПЕНСАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДРУКОВАНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ СЕНСОРІВ У БАГАТОРІВНЕВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	24
3	<i>Хламов С.В., Орлов С.В., Табакова І.С.</i> РОЗПОДІЛЕНА МІКРОСЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ОБРОБКИ АСТРОНОМІЧНИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕЦИФІКАЦІЇ ORENARI	54
4	<i>Хламов С.В., Нетребін Ю.М, Трунова Т.О.</i> КОНВЕЄР ОБРОБКИ ДЛЯ АСТРОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРАВИЛ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ	74
5	<i>Олійник В.М., Бізюк А.В.</i> ПРОЄКТУВАННЯ КОГНІТИВНО-АДАПТИВНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРАКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ ШІ	94
6	<i>Слісаренко Р.В.</i> МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕКСТОВИХ КОРПУСІВ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДИСТАНЦІЙНІЙ ОСВІТІ	118
7	<i>Хорошевська І.О.</i> МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ІНТЕГРАЦІЇ ЦИФРОВИХ НАВЧАЛЬНИХ ІГОР У МУЛЬТИМЕДІЙНІ ОСВІТНІ РЕСУРСИ	133
8	<i>Кулішова Н.Є., Білець Д.Ю., Гарбузова Д.С.</i> МІСЦЕВА КОРЕКЦІЯ КОЛЬОРІВ КОНТЕНТУ ДЛЯ ГАРМОНІЗАЦІЇ ВЕБСТОРИНОК	168
9	<i>Краєвська О.О, Шеліхова І.Б., Адашевська І.Ю.</i> РОЛЬ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АВТОМАТИЗАЦІЇ UX/UI-ДИЗАЙНУ ПРИ СТВОРЕННІ ВЕБЗАСТОСУНКІВ	191
10	<i>Andriushchenko T.</i> METHODOLOGICAL JUSTIFICATION FOR AI-INTEGRATED STEAM EDUCATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR FUTURE PROFESSIONALS IN THE PUBLISHING AND PRINTING INDUSTRY	206
11	<i>Бізюк А.В., Андрющенко Т.Ю., Горохова І.М.</i> ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОБОТИ З ВЕКТОРНИМИ КОНТУРАМИ У ДИСЦИПЛІНАХ «ШРИФТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ» ТА «ОБРОБКА ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ»	229
12	<i>Лозинська О.В., Висоцька В.А., Марків О.О., Бахмат К.Ю.</i> РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДОСТОВІРНОСТІ НОВИН ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЇХ ДЖЕРЕЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ	252

13	<i>Chebotarova I., Manakov V., Artakov M., Hrozian Ya.</i>	262
	FEATURES OF EARLY DIAGNOSIS OF THE EFFECTIVENESS OF MULTIMEDIA CAMPAIGNS IN GOOGLE ADS	
14	<i>Selmenska Z., Dubnevych M., Mykytyuk O.</i>	297
	COGNITIVE ASPECTS AND THE EDUCATIONAL POTENTIAL OF INFOGRAPHICS IN THE CONTEXT OF INCREASING INFORMATION FLOWS	
15	<i>Guryev I., Gurieva N.</i>	315
	INTEGRATION OF A STANDARDIZED BOULDERING BOARD INTO AN ARCHITECTURE FOR SIMULTANEOUS TRAINING MANAGEMENT	
16	<i>Soroka N., Hrytsai I., Ogirko I.</i>	325
	PRINCIPLES OF DESIGNING A DIGITAL TWIN AND USER INTERFACE FOR A MACHINE TOOL BASED ON SYSTEM MODELING OF THE GEAR CUTTING PROCESS	
17	<i>Kulchytska Kh.</i>	335
	HYBRID MULTIMODAL TEXT DIGITIZATION FOR PUBLISHING AND PRINTING	
18	<i>Костарєв Д.Б., Тєвяшев А.Д., Сїзова Н.Д., Ткаченко В.П.</i>	345
	ПРОАКТИВНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ РАННЬОГО ВІЯВЛЕННЯ ТА АКТИВНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ВІД ПОЖЕЖ	
19	<i>Бобарчук О.А., Злотківська Т.В.</i>	362
	ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ	
	АНОТАЦІЇ	381
	АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	391

ВСТУП

Монографію підготовлено за матеріалами міжнародної науково-технічної конференції «Поліграфічні, мультимедійні та web-технології», організаторами проведення якої є кафедра «Медіасистем та технології» Харківського національного університету радіоелектроніки та кафедра мультимедійних технологій Інституту поліграфії та медійних технологій Національного університету «Львівська політехніка».

Мета конференції – розширення міжнародного співробітництва та поглиблення спільної діяльності у науковій, дослідницькій, викладацькій та інших сферах, в галузі видавничої справи, поліграфії, мультимедійних технологій, економіки галузевих підприємств; підвищення ефективності освітнього процесу з підготовки фахівців для видавничо-поліграфічної галузі та впровадження в навчальний процес інноваційних форм і методів навчання.

Основні питання, що розглядалися в рамках конференції.

1. Технічні й технологічні інновації у виробництві друкованої продукції та пакувальному виробництві.

2. Інформаційні системи та технології в поліграфії. Інтелектуальні системи.

3. Мультимедійні та web-технології. Розробка додатків для мобільних пристроїв. UI/UX інтерфейси.

4. 2D та 3D-графіка, графічний дизайн, управління кольором.

5. Медіакомунікації, книжкова справа, маркетинг і реклама в поліграфії.

6. Використання нових методів навчання у видавничо-поліграфічній галузі, зв'язок навчального процесу з виробництвом.

У монографії колективом авторів висвітлено актуальні питання розвитку сучасних цифрових, мультимедійних та поліграфічних технологій. Значна увага приділена дослідженню інноваційних підходів у сфері web-технологій, мультимедійних видань, цифрового дизайну, інтеграції штучного інтелекту в інформаційні системи, а також автоматизації процесів у видавничо-поліграфічній галузі. У роботах розглянуто питання створення когнітивно-адаптивних інтерфейсів, мультимодальної цифрової обробки тексту, тематичного моделювання текстових корпусів, інтелектуального аналізу даних та використання сучасних AI-технологій у навчанні, рекламі, дизайні й медіакомунікаціях.

Важливе місце займають дослідження у сфері друкарських технологій, аналізу друкарських матеріалів, екологічності виробничих процесів та впровадження інтелектуальних систем управління у поліграфічному виробництві.

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЄКТУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ВИДАНЬ У ЦИФРОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Хламов С.В.

к.т.н., доцент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

***Анотація.** Дослідження присвячене розробці методології проєктування мультимедійних видань у цифровому середовищі. Запропонована методологія поєднує аналіз цільової аудиторії, формування інформаційної архітектури, UX та інтерактивність, візуальний дизайн і технологічну реалізацію. Практичне застосування методології дозволяє створювати цифрові продукти, що забезпечують ефективне сприйняття інформації, зручну навігацію та високий рівень користувацького досвіду.*

***Ключові слова:** мультимедійне видання, цифрове середовище, UX, інформаційна архітектура, інтерактивність, методологія проєктування.*

Вступ

Цифрові технології суттєво трансформували способи створення, поширення та сприйняття інформації. Якщо ще кілька років тому домінуючою формою передачі знань залишалися друковані видання, то сьогодні інформаційний простір дедалі більше переходить у цифрову площину. У цьому середовищі мультимедійні видання набувають особливого значення, оскільки поєднують різні форми подання інформації – текст, зображення, аудіо та відео – і забезпечують інтерактивну взаємодію з користувачем. Такий синтез медіа створює нові можливості для представлення знань, підвищує рівень залученості аудиторії та відкриває перспективи для інновацій у видавничій сфері. Сучасне цифрове середовище характеризується високою динамічністю, великими обсягами інформації та різноманітним платформ доступу – від персональних комп'ютерів до мобільних пристроїв [1]. У таких умовах зростають вимоги до якості мультимедійних продуктів, їхньої адаптивності, зручності використання та здатності швидко реагувати на зміну потреб користувачів. Водночас просте поєднання різних медіа не гарантує ефективності видання. Вирішальним фактором стає саме підхід до його проєктування – наскільки логічно структурований контент, наскільки зрозуміло організована навігація, і наскільки гармонійно інтегровані всі складові. У цьому контексті особливого значення набуває формування чіткої методології проєктування мультимедійних видань. Відсутність системного підходу часто призводить до створення перевантажених або складних для сприйняття продуктів, що знижує їхню ефективність і практичну цінність. Натомість продумана методологія дозволяє забезпечити узгодженість усіх елементів видання, оптимізувати процес розробки та досягти високого рівня якості кінцевого результату.

Мета та задачі дослідження

Це дослідження присвячене аналізу та узагальненню підходів до проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі. Основна увага зосереджена на визначенні принципів, методів і моделей, які забезпечують створення ефективних, зручних і функціональних цифрових продуктів [2]. У роботі розглядаються як теоретичні засади мультимедіа, так і практичні аспекти реалізації мультимедійних видань, включаючи організацію контенту, побудову інтерфейсів і забезпечення взаємодії з користувачем.

Особливу увагу приділено ролі користувацького досвіду, який у сучасних умовах виступає одним із ключових критеріїв якості цифрового продукту. Ефективне мультимедійне видання повинно не лише передавати інформацію, але й бути інтуїтивно зрозумілим, зручним у використанні та адаптованим до різних сценаріїв взаємодії [3]. Це вимагає врахування поведінкових характеристик користувачів, їхніх очікувань і особливостей сприйняття інформації в цифровому середовищі. Крім того, дослідження охоплює питання інтеграції мультимедійних компонентів, що є однією з ключових складових сучасних цифрових видань. Гармонійне поєднання тексту, графіки, аудіо та відео дозволяє створювати цілісний інформаційний продукт, у якому кожен елемент виконує свою функцію та доповнює інші. При цьому важливо забезпечити баланс між насиченістю контенту та зручністю його сприйняття, що досягається завдяки використанню відповідних принципів дизайну та організації інформації.

Практична цінність дослідження полягає у можливості застосування запропонованих підходів у різних сферах, зокрема у видавничій діяльності, освіті, медіаіндустрії та розробці цифрових продуктів. Описані методи можуть бути використані при створенні електронних книг, інтерактивних навчальних ресурсів, вебсайтів і мобільних застосунків. Вони дозволяють систематизувати процес розробки, підвищити якість мультимедійних видань і зробити їх більш орієнтованими на потреби користувачів.

Структура дослідження побудована таким чином, щоб забезпечити послідовне розкриття теми – від загальних теоретичних положень до конкретних практичних рішень. У першому розділі розглядаються теоретичні основи мультимедійних видань, їх еволюція та особливості функціонування в цифровому середовищі. Другий розділ присвячений методології проектування, включаючи принципи, підходи та моделі побудови мультимедійних продуктів. У третьому розділі висвітлюються практичні та технологічні аспекти реалізації мультимедійних видань, а також окреслюються перспективи їх подальшого розвитку з урахуванням сучасних технологічних тенденцій.

Таким чином, дане дослідження спрямоване на формування цілісного уявлення про процес проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі. Воно поєднує теоретичний аналіз і практичні рекомендації, що дозволяє розглядати його як основу для подальших наукових досліджень і як інструмент для фахівців, які працюють у сфері створення цифрового контенту.

Основна частина

Теоретичні основи мультимедійних видань

Поняття мультимедійного видання та його еволюція.

Поняття мультимедійного видання сформувалося у відповідь на розвиток цифрових технологій та зміну способів сприйняття інформації. У найзагальнішому вигляді мультимедійне видання можна визначити як інформаційний продукт, у якому поєднуються різні форми подання даних – текстова, графічна, аудіальна та відео – з можливістю інтерактивної взаємодії користувача з контентом.

На відміну від традиційних друкованих видань, мультимедійні продукти не мають лінійної структури. Користувач отримує можливість самостійно обирати траєкторію перегляду матеріалу, що суттєво змінює сам принцип організації інформації. Таким чином, мультимедійне видання є не лише носієм інформації, а й середовищем взаємодії, у якому важливу роль відіграє навігація, логіка переходів та інтерактивні елементи.

Еволюція мультимедійних видань тісно пов'язана з розвитком інформаційних технологій. На початковому етапі, у 1980-1990-х роках, мультимедіа реалізовувалися переважно у вигляді офлайн-продуктів на фізичних носіях, таких як CD-ROM. Ці видання містили енциклопедії, навчальні програми та довідкові системи, у яких поєднувалися текст, зображення та прості анімації.

З поширенням інтернету наприкінці XX – на початку XXI століття мультимедійні видання перейшли у мережеве середовище. Веб-технології забезпечили нові можливості для інтеграції мультимедійного контенту, що сприяло появі онлайн-видань, інтерактивних журналів і цифрових бібліотек. Важливою особливістю цього етапу стало впровадження гіпертексту, який дозволив реалізувати нелінійну структуру подання інформації.

Подальший розвиток мобільних технологій і ширококутного доступу до інтернету сприяв появі мультимедійних видань, орієнтованих на різні пристрої – смартфони, планшети, ноутбуки. Це зумовило необхідність адаптивного дизайну та врахування різних сценаріїв використання контенту. У результаті мультимедійні видання стали більш персоналізованими та інтерактивними.

На сучасному етапі розвитку мультимедійні видання інтегрують новітні технології, такі як доповнена реальність (AR), віртуальна реальність (VR) та елементи штучного інтелекту. Це дозволяє створювати більш складні та насичені інформаційні середовища, у яких користувач не лише споживає контент, а й активно взаємодіє з ним.

Таким чином, еволюція мультимедійних видань відображає загальні тенденції розвитку інформаційного суспільства – перехід від статичних форм подання інформації до інтерактивних і динамічних систем. Це, у свою чергу, зумовлює необхідність переосмислення підходів до їх проектування, що стає ключовим завданням сучасних досліджень у цій галузі.

Класифікація та типологія мультимедійних видань.

Різноманіття мультимедійних видань, що сформувалося в умовах цифрового середовища, зумовлює необхідність їх систематизації [4]. Класифікація дозволяє впорядкувати існуючі типи мультимедійних продуктів, визначити їхні характерні ознаки та встановити зв'язки між різними формами подання інформації. Це, у свою чергу, створює основу для розробки ефективних підходів до їх проектування.

Однією з базових ознак класифікації є функціональне призначення мультимедійного видання [5]. За цим критерієм можна виокремити інформаційні, освітні, наукові, розважальні та рекламні видання.

Інформаційні мультимедійні продукти орієнтовані на оперативне донесення актуальних даних (наприклад, новинні вебресурси), тоді як освітні – спрямовані на формування знань і навичок, часто із використанням інтерактивних елементів. Наукові мультимедійні видання відзначаються структурованістю, достовірністю та глибиною подання матеріалу. Розважальні продукти, у свою чергу, акцентують увагу на візуальній привабливості та залученні користувача, а рекламні – на ефективній комунікації з потенційною аудиторією.

Іншим важливим критерієм є спосіб поширення. За цією ознакою мультимедійні видання поділяються на локальні (офлайн) та мережеві (онлайн). Локальні видання, що були характерні для ранніх етапів розвитку мультимедіа, розповсюджувалися на фізичних носіях. Натомість сучасні мультимедійні продукти переважно функціонують у мережевому середовищі, що забезпечує їхню доступність, оновлюваність та інтеграцію з іншими цифровими сервісами.

Важливим є також рівень інтерактивності, який визначає ступінь участі користувача у взаємодії з контентом [6]. За цим критерієм можна виділити статичні, динамічні та інтерактивні мультимедійні видання. Статичні продукти передбачають пасивне сприйняття інформації, динамічні – включають анімацію та змінювані елементи, тоді як інтерактивні видання дозволяють користувачеві впливати на зміст і структуру матеріалу, обирати сценарії перегляду та взаємодіяти з окремими компонентами.

Ще одним критерієм класифікації є структура подання інформації. За цією ознакою мультимедійні видання можуть бути лінійними або нелінійними. Лінійна структура передбачає послідовне відтворення матеріалу, що характерно для відео чи презентацій. Нелінійна структура, навпаки, забезпечує вільну навігацію між елементами контенту, що є типовим для вебресурсів і інтерактивних додатків.

З точки зору платформи реалізації, мультимедійні видання поділяються на веб-орієнтовані, мобільні та кросплатформені. Веб-орієнтовані продукти функціонують у браузері, мобільні – адаптовані для використання на смартфонах і планшетах, тоді як кросплатформені забезпечують однаковий досвід взаємодії незалежно від пристрою.

Окрему увагу слід приділити типології мультимедійних видань, яка враховує їхню змістову та функціональну специфіку. До основних типів належать

електронні книги, інтерактивні журнали, освітні платформи, мультимедійні енциклопедії, веб-сайти та мобільні застосунки. Кожен із цих типів має власні особливості структури, дизайну та взаємодії з користувачем, що необхідно враховувати під час проектування.

Таким чином, класифікація мультимедійних видань є багатовимірною і базується на сукупності різних критеріїв. Її використання дозволяє не лише систематизувати існуючі підходи, але й визначити оптимальні рішення для створення конкретного мультимедійного продукту залежно від його призначення, цільової аудиторії та умов функціонування. Це створює основу для подальшого розгляду методологічних аспектів проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі.

Особливості цифрового середовища.

Цифрове середовище є ключовим чинником, що визначає специфіку створення та функціонування мультимедійних видань. На відміну від традиційних медіа, воно характеризується високим рівнем динамічності, інтерактивності та технологічної гнучкості. Саме ці властивості формують нові вимоги до структури, змісту та способів подання інформації. Однією з визначальних характеристик цифрового середовища є інтерактивність. Користувач перестає бути пасивним споживачем інформації і виступає активним учасником комунікаційного процесу. Він може обирати послідовність перегляду матеріалу, взаємодіяти з елементами інтерфейсу, впливати на відображення контенту. Це, у свою чергу, змінює підходи до проектування мультимедійних видань, де необхідно враховувати різні сценарії поведінки користувачів.

Ще однією важливою особливістю є нелінійність подання інформації. У цифровому середовищі інформація організовується у вигляді мережевих структур, що базуються на гіпертекстових зв'язках. Це дозволяє користувачеві самостійно визначати маршрут навігації, переходячи між різними фрагментами контенту. Такий підхід підвищує гнучкість доступу до інформації, але водночас ускладнює процес її структуризації.

Цифрове середовище також характеризується мультимедійністю, тобто можливістю інтеграції різних типів даних в одному інформаційному продукті. Текст, зображення [7], аудіо та відео можуть одночасно використовуватися для передачі інформації, доповнюючи один одного. Водночас ефективність такого поєднання залежить від правильного балансу між різними компонентами та їхньої відповідності змісту.

Важливою характеристикою є адаптивність, що полягає у здатності цифрових продуктів пристосовуватися до різних пристроїв і умов використання. Сучасні мультимедійні видання повинні коректно відображатися на екранах різних розмірів і забезпечувати зручну взаємодію незалежно від платформи [8]. Це зумовлює необхідність використання адаптивного дизайну та врахування технічних обмежень.

Не менш значущою є оперативність оновлення інформації. На відміну від друкованих видань, цифрові продукти можуть змінюватися та доповнюватися у режимі реального часу [9]. Це відкриває можливості для актуалізації контенту, але водночас потребує організації процесів керування інформацією та контролю її якості. Цифрове середовище [10-13] також характеризується персоналізацією контенту. Завдяки використанню аналітичних інструментів і алгоритмів обробки даних стає можливим адаптувати зміст мультимедійного видання до індивідуальних потреб користувача. Це підвищує ефективність взаємодії, але водночас вимагає врахування етичних і технологічних аспектів використання даних. Okремо слід відзначити інтегрованість цифрового середовища, яка проявляється у взаємодії різних платформ, сервісів і технологій [14]. Мультимедійні видання можуть бути пов'язані із соціальними мережами, базами даних, хмарними сервісами та іншими інформаційними системами. Це розширює їхні функціональні можливості, але також ускладнює процес проектування та реалізації. Таким чином, цифрове середовище формує нові умови для створення мультимедійних видань, що вимагає врахування його ключових характеристик – інтерактивності, нелінійності, мультимедійності, адаптивності, оперативності, персоналізації та інтегрованості. Розуміння цих особливостей є необхідною передумовою для розробки ефективної методології проектування мультимедійних продуктів.

Конвергенція медіа та трансформація видавничої діяльності.

Розвиток цифрових технологій сприяв процесу конвергенції медіа, який полягає у зближенні та взаємопроникненні різних форм комунікації. У сучасному інформаційному просторі межі між друкованими, електронними та аудіовізуальними медіа поступово стираються, що призводить до формування нових форматів контенту та змін у видавничій діяльності.

Конвергенція медіа проявляється насамперед у поєднанні різних каналів передачі інформації в межах одного продукту. Наприклад, сучасні цифрові видання можуть одночасно містити текстові матеріали, відеоінтерв'ю, інтерактивні інфографіки та аудіокоментарі [15]. Це створює більш насичене інформаційне середовище, у якому користувач отримує доступ до різних форм контенту.

Важливим аспектом є також інтеграція платформ [16], що дозволяє поширювати мультимедійні видання через різні канали – веб-сайти, мобільні додатки, соціальні мережі. Такий підхід забезпечує ширше охоплення аудиторії та підвищує доступність інформації. Водночас це потребує уніфікації форматів і адаптації контенту до специфіки кожної платформи.

Конвергенція медіа суттєво впливає на роль видавця та автора. Традиційна модель, у якій автор створює текст, а видавець забезпечує його поширення, трансформується у більш складну систему взаємодії. Сьогодні у процесі створення мультимедійного видання беруть участь різні фахівці: редактори, дизайнери, розробники, спеціалісти з UX та аналітики [17]. Це зумовлює необхідність міждисциплінарного підходу до проектування.

Зміни відбуваються і в економічній моделі видавничої діяльності. Цифрові технології відкривають нові можливості для монетизації контенту, зокрема через підписки, рекламу, платний доступ або інтеграцію з іншими сервісами. Це впливає на структуру мультимедійних видань і визначає їхню функціональність.

Крім того, конвергенція медіа сприяє розвитку інтерактивних форм комунікації, у яких користувачі можуть не лише споживати контент, але й брати участь у його створенні або обговоренні. Коментарі, рейтинги, соціальні мережі стають невід'ємною частиною мультимедійних видань, формуючи новий тип взаємодії між автором і аудиторією.

Таким чином, конвергенція медіа є одним із ключових факторів трансформації сучасної видавничої діяльності [18]. Вона змінює підходи до створення, поширення та сприйняття інформації, а також визначає нові вимоги до проектування мультимедійних видань. Урахування цих змін є необхідним для розробки ефективних цифрових продуктів, що відповідають сучасним умовам інформаційного середовища.

У ході аналізу встановлено, що мультимедійне видання є складним інформаційним продуктом, який поєднує різні форми подання контенту – текстову, графічну, аудіальну та відео – і передбачає інтерактивну взаємодію з користувачем. Його суттєвою відмінністю від традиційних видань є нелінійна структура та орієнтація на активну участь користувача у процесі сприйняття інформації.

Розглянуто еволюцію мультимедійних видань, яка відображає загальні тенденції розвитку інформаційних технологій: від локальних офлайн-продуктів до інтерактивних мережевих платформ. Встановлено, що сучасний етап розвитку характеризується високим рівнем інтеграції технологій, адаптивністю та орієнтацією на персоналізований користувацький досвід.

Здійснено класифікацію мультимедійних видань за різними критеріями, зокрема за функціональним призначенням, способом поширення, рівнем інтерактивності, структурою подання інформації та платформою реалізації. Це дозволило систематизувати різноманіття існуючих мультимедійних продуктів і визначити їхні типологічні особливості, що є важливим для подальшого проектування.

Проаналізовано основні характеристики цифрового середовища, серед яких інтерактивність, нелінійність, мультимедійність, адаптивність, оперативність оновлення, персоналізація та інтегрованість. Встановлено, що саме ці властивості визначають специфіку створення мультимедійних видань і формують вимоги до їх структури та функціональності [19].

Окрему увагу приділено процесу конвергенції медіа, який зумовлює зближення різних форм комунікації та трансформацію видавничої діяльності. Визначено, що сучасні мультимедійні видання створюються в умовах інтеграції різних платформ, участі міждисциплінарних команд і використання нових економічних моделей.

Узагальнюючи результати розділу, можна зробити висновок, що мультимедійні видання є складними багатокomпонентними системами, функціонування яких визначається особливостями цифрового середовища та сучасними технологічними тенденціями [20].

Це зумовлює необхідність розробки цілісної методології їх проектування, яка враховує як структурні, так і функціональні аспекти створення цифрових продуктів.

Методологія проектування мультимедійних видань

Сутність і структура методології проектування.

Проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі є складним міждисциплінарним процесом, що поєднує елементи інформаційних технологій, дизайну, когнітивної психології та видавничої справи.

У цьому контексті методологія проектування виступає як системно організована сукупність принципів, підходів, методів і засобів, що визначають логіку створення мультимедійного продукту – від формування ідеї до реалізації та оцінювання результату.

Сутність методології полягає у забезпеченні цілісності та узгодженості всіх етапів розробки мультимедійного видання. Вона дозволяє уникнути фрагментарності у прийнятті рішень, забезпечує логічну структуру продукту та сприяє досягненню його функціональної ефективності.

На відміну від суто технічного підходу, методологія охоплює не лише інструменти реалізації, але й концептуальні засади організації контенту та взаємодії з користувачем.

Структура методології проектування мультимедійних видань може бути представлена у вигляді взаємопов'язаних компонентів:

- концептуальний рівень, що включає визначення мети, цільової аудиторії, функціонального призначення та загальної ідеї видання;
- структурний рівень, пов'язаний із побудовою інформаційної архітектури, логіки подання матеріалу та навігаційної системи;
- дизайнерський рівень, який охоплює візуальне оформлення, інтерфейс і засоби представлення контенту;
- технологічний рівень, що передбачає вибір програмних засобів, платформ і форматів реалізації;
- оцінювальний рівень, спрямований на перевірку якості продукту та його відповідності поставленим цілям.

Важливою характеристикою методології є її системність, що означає розгляд мультимедійного видання як цілісної системи, елементи якої взаємодіють між собою. Зміни в одному компоненті (наприклад, у структурі контенту) неминуче впливають на інші (навігацію, дизайн, взаємодію), що потребує узгодженого підходу до проектування.

Методологія також має ієрархічний характер, оскільки передбачає послідовний перехід від загальних концептуальних рішень до конкретних

технічних реалізацій. Це дозволяє забезпечити логічність і послідовність у процесі створення мультимедійного видання.

Окрему роль відіграє орієнтація на користувача, яка є базовим принципом сучасного проектування. У межах методології це означає врахування потреб, очікувань і поведінкових характеристик цільової аудиторії на всіх етапах розробки. Такий підхід забезпечує підвищення ефективності взаємодії користувача з продуктом.

Крім того, методологія проектування мультимедійних видань характеризується гнучкістю, що дозволяє адаптувати її до різних типів продуктів і умов реалізації.

У сучасному цифровому середовищі, яке постійно змінюється, важливо забезпечити можливість швидкого оновлення контенту, модифікації структури та інтеграції нових технологій.

Таким чином, методологія проектування мультимедійних видань є багаторівневою системою, що забезпечує узгоджене функціонування всіх компонентів цифрового продукту. Вона виступає основою для формування ефективних підходів до створення мультимедійних видань і визначає логіку подальших етапів дослідження.

Принципи проектування мультимедійних видань.

Принципи проектування є базовими положеннями, що визначають підходи до створення мультимедійних видань і забезпечують їхню ефективність у цифровому середовищі. Вони формуються на основі узагальнення практичного досвіду, результатів наукових досліджень у галузі інформаційних технологій, дизайну та когнітивної психології, а також з урахуванням особливостей сприйняття інформації користувачем.

Одним із ключових є принцип *системності*, який передбачає розгляд мультимедійного видання як цілісної структури, де всі елементи – контент, інтерфейс, навігація та функціональні компоненти – взаємопов'язані. Застосування цього принципу дозволяє забезпечити узгодженість усіх складових і уникнути фрагментарності у поданні інформації.

Важливим є також принцип *цілеспрямованості*, що полягає у підпорядкуванні всіх рішень загальній меті видання. Кожен елемент мультимедійного продукту має виконувати визначену функцію і сприяти досягненню поставлених завдань, будь то інформування, навчання чи залучення користувача.

Принцип *орієнтації* на користувача (user-centered design) є одним із визначальних у сучасному проектуванні. Він передбачає врахування потреб, очікувань і поведінкових характеристик аудиторії на всіх етапах створення продукту. Це включає аналіз цільової аудиторії, розробку сценаріїв використання та тестування з участю користувачів.

Не менш важливим є принцип *доступності*, який передбачає забезпечення можливості використання мультимедійного видання максимально широким

колом користувачів, у тому числі з урахуванням різних технічних можливостей і фізичних обмежень. Це включає оптимізацію інтерфейсу, адаптацію контенту та дотримання стандартів доступності.

Принцип *інтерактивності* визначає необхідність активної взаємодії користувача з контентом. Інтерактивні елементи повинні бути логічно інтегровані в структуру видання та сприяти кращому розумінню матеріалу, а не лише виконувати декоративну функцію. Принцип *мультиmodalності* полягає у доцільному поєднанні різних форм подання інформації – тексту, графіки, аудіо та відео. Ефективне використання цього принципу дозволяє підвищити рівень сприйняття інформації, враховуючи різні канали її обробки людиною.

Важливу роль відіграє принцип *когнітивної відповідності*, який передбачає узгодження структури та форми подання інформації з особливостями людського мислення і сприйняття. Надмірна складність, перевантаження елементами або нелогічна організація контенту можуть суттєво знижувати ефективність мультимедійного видання. Принцип *адаптивності* полягає у здатності мультимедійного продукту коректно функціонувати на різних пристроях і в різних умовах використання. Це включає як технічну адаптацію інтерфейсу, так і оптимізацію контенту для різних форматів споживання.

Крім того, важливим є принцип *масштабованості*, що передбачає можливість розширення функціональності та обсягу контенту без порушення цілісності системи. Це особливо актуально для цифрових продуктів, які постійно оновлюються та розвиваються. Нарешті, слід відзначити принцип *оцінюваності*, який передбачає можливість аналізу ефективності мультимедійного видання. Це досягається через використання метрик, тестування та збору зворотного зв'язку від користувачів, що дозволяє вдосконалювати продукт.

Таким чином, принципи проєктування мультимедійних видань формують теоретичну основу для прийняття обґрунтованих рішень у процесі їх створення. Їх комплексне застосування забезпечує формування якісного, функціонального та орієнтованого на користувача цифрового продукту.

Інформаційна архітектура, інтерактивність і користувацький досвід.

Інформаційна архітектура мультимедійного видання є ключовим елементом його проєктування, оскільки визначає логіку організації контенту, структуру взаємозв'язків між інформаційними елементами та принципи навігації. У поєднанні з інтерактивністю та користувацьким досвідом вона формує цілісне середовище взаємодії користувача з цифровим продуктом.

Під інформаційною архітектурою розуміють систему організації, структурування та подання інформації, що забезпечує її зрозумілість і доступність для користувача. Основною метою є створення такої структури, яка дозволяє швидко знаходити потрібні дані, легко орієнтуватися у змісті та ефективно взаємодіяти з контентом.

Одним із базових підходів до побудови інформаційної архітектури є ієрархічна організація контенту, за якої інформація розподіляється за рівнями –

від загального до конкретного. Такий підхід забезпечує логічність структури та спрощує навігацію. Альтернативою є мережева (гіпертекстова) структура, яка дозволяє встановлювати множинні зв'язки між елементами контенту та забезпечує нелінійний доступ до інформації.

Важливою складовою інформаційної архітектури є навігаційна система, яка визначає способи переміщення користувача в межах видання. Вона повинна бути інтуїтивно зрозумілою, передбачуваною та узгодженою зі структурою контенту. Основними елементами навігації виступають меню, посилання, кнопки та інші інтерактивні компоненти.

Інтерактивність, у свою чергу, виступає як механізм реалізації взаємодії між користувачем і мультимедійним виданням. Вона дозволяє не лише отримувати інформацію, але й впливати на її подання, обирати сценарії перегляду, виконувати дії з контентом. Рівень інтерактивності може варіюватися від простих елементів керування до складних систем, що адаптуються до поведінки користувача.

Ефективна інтерактивність базується на кількох принципах: логічності, передбачуваності та доцільності. Інтерактивні елементи повинні бути зрозумілими для користувача, відповідати його очікуванням і виконувати функціональну роль, а не лише декоративну. Надмірна або невиправдана інтерактивність може ускладнювати сприйняття інформації та знижувати зручність використання.

Користувацький досвід (UX) є інтегральною характеристикою, що відображає якість взаємодії користувача з мультимедійним виданням. Він формується під впливом багатьох факторів: структури контенту, зручності навігації, швидкості роботи системи, візуального оформлення та загальної логіки взаємодії.

Проектування користувацького досвіду передбачає врахування поведінкових моделей користувачів, їхніх потреб і очікувань. Для цього використовуються різні методи, зокрема аналіз сценаріїв використання, створення прототипів, тестування інтерфейсів і збір зворотного зв'язку.

Такий підхід дозволяє виявляти проблеми на ранніх етапах розробки та вдосконалювати продукт. Особливу роль відіграє узгодженість інформаційної архітектури, інтерактивності та UX. Структура контенту повинна відповідати логіці взаємодії, а інтерактивні елементи – підтримувати навігацію та сприяти досягненню цілей користувача. Порушення цієї узгодженості призводить до зниження ефективності мультимедійного видання.

Таким чином, інформаційна архітектура, інтерактивність і користувацький досвід утворюють взаємопов'язану систему, що визначає якість мультимедійного продукту. Їх комплексне врахування у процесі проектування дозволяє створювати зручні, зрозумілі та ефективні цифрові видання, орієнтовані на потреби користувача.

Моделі та етапи проектування мультимедійних видань.

Проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі вимагає системного і послідовного підходу, який поєднує наукові принципи, дизайнерські рішення та технологічну реалізацію.

У сучасному контексті цей процес розглядають як комплексну методологію, що охоплює весь життєвий цикл продукту – від концептуальної ідеї до впровадження і подальшого вдосконалення. Методологія не є статичною схемою, вона ітераційна: кожен етап може уточнюватися, змінюватися та повторюватися відповідно до зворотного зв'язку та потреб користувачів.

Методологія проектування мультимедійного видання.

1. Аналітично-концептуальний етап:

- визначення мети видання;
- аналіз цільової аудиторії;
- дослідження аналогів і конкурентних продуктів;
- формування концепції та функціональних завдань.

2. Проектування інформаційної архітектури:

- розробка структури контенту;
- визначення зв'язків між інформаційними блоками;
- проектування навігаційної системи;
- формування сценаріїв використання.

3. Проектування користувацького досвіду (UX) та інтерактивності:

- розробка сценаріїв користувача;
- створення прототипів (wireframes);
- визначення інтерактивних елементів;
- забезпечення логічності та передбачуваності взаємодії.

4. Візуально-дизайнерське проектування (UI):

- розробка графічного стилю та макетів;
- інтеграція мультимедійних елементів (відео, графіка, аудіо);
- забезпечення візуальної ієрархії та естетики.

5. Технологічна реалізація:

- вибір технологій і платформ;
- програмна інтеграція контенту та функцій;
- забезпечення адаптивності, продуктивності та сумісності.

6. Тестування та оцінювання якості:

- юзабіліті-тестування;
- технічне тестування (швидкість, стабільність);
- аналіз взаємодії користувачів;
- виявлення помилок і внесення коректив.

7. Впровадження та супровід:

- публікація продукту;
- моніторинг використання та аналіз статистики;
- оновлення контенту та функціоналу;
- вдосконалення продукту на основі зворотного зв'язку.

Методологія проєктування мультимедійного видання базується на системному та ітераційному підходах. Вона охоплює весь життєвий цикл продукту – від ідеї до впровадження та постійного вдосконалення. Кожен етап методології логічно впливає з попереднього і забезпечує цілісність та узгодженість всіх компонентів видання.

Аналітично-концептуальний етап формує основу всього проєкту. Тут визначаються мета, функціональне призначення видання, його аудиторія та особливості сприйняття. Дослідження аналогів дозволяє виявити сильні та слабкі сторони існуючих рішень і уникнути повторень. Концепція видання стає керівним документом для всіх подальших рішень.

Проєктування інформаційної архітектури забезпечує логіку подання контенту та зручну навігацію. Важливо створити структуру, де користувач зможе швидко знаходити потрібну інформацію, а нелінійні зв'язки дозволяють формувати індивідуальні маршрути взаємодії.

Навігаційна система і сценарії використання визначають, як користувач рухатиметься між інформаційними блоками. Проєктування UX та інтерактивності спрямоване на забезпечення активної участі користувача у взаємодії з виданням. Створюються сценарії використання, прототипи інтерфейсу та інтерактивні елементи, які роблять продукт інтуїтивним і передбачуваним. UX-дизайн допомагає забезпечити зручність, логічність і послідовність взаємодії.

Візуально-дизайнерське проєктування (UI) формує естетичний і функціональний образ продукту. Тут розробляються графічні стилі, макети інтерфейсу та інтегруються мультимедійні елементи. Візуальна ієрархія допомагає користувачеві швидко орієнтуватися та сприймати інформацію.

Технологічна реалізація перетворює концепцію в готовий продукт. Вибір платформ і технологій, інтеграція контенту та забезпечення адаптивності дозволяють виданню працювати на різних пристроях та відповідати сучасним стандартам.

Тестування та оцінювання якості забезпечує контроль ефективності та зручності використання [21, 22]. Юзабіліті-тестування, технічна перевірка та аналіз взаємодії користувачів дозволяють виявити помилки та внесення коректив ще до публікації. Впровадження та супровід гарантують, що видання залишатиметься актуальним і функціональним. Моніторинг, оновлення контенту та вдосконалення функціоналу забезпечують довгострокову ефективність і відповідність потребам користувачів.

Ця методологія поєднує інформаційну архітектуру, UX та технологічні аспекти в єдину систему. Вона дозволяє створювати мультимедійні видання, які є інтерактивними, адаптивними, зручними для користувача і готовими до подальшого розвитку в умовах постійних змін цифрового середовища.

У другому розділі дослідження представлено комплексну методологію проєктування мультимедійних видань, яка охоплює всі етапи створення продукту – від формування концепції до впровадження та подальшого вдосконалення. Вона

поєднує інформаційну архітектуру, UX, дизайн і технологічну реалізацію, забезпечуючи цілісність та узгодженість усіх компонентів видання [23].

Методологія передбачає ітераційний підхід: кожен етап логічно впливає з попереднього, але можливі уточнення на основі тестування та зворотного зв'язку. Це забезпечує гнучкість у роботі та дозволяє адаптувати продукт до потреб користувачів і змін цифрового середовища.

Орієнтація на користувача та інтерактивність є ключовими аспектами методології. Вони гарантують зручність, передбачуваність і ефективність взаємодії з виданням, підвищуючи якість сприйняття інформації та залучення аудиторії. Запропонована методологія є універсальною і застосовною для різних типів мультимедійних видань.

Вона підтримує масштабованість продукту, інтеграцію нових технологій і оновлення контенту без втрати структурної цілісності. Таким чином, методологія формує науково обґрунтовану основу для створення ефективних мультимедійних видань, що відповідають сучасним вимогам цифрового середовища та забезпечують високий рівень користувацького досвіду [24].

Результати досліджень

Практичне застосування методології

Реалізація концепції та інформаційної архітектури.

Перший етап практичної реалізації методології полягає у визначенні основних цілей та завдань мультимедійного видання. На цьому етапі критично важливо чітко сформулювати, яку функцію виконуватиме продукт: освітню, інформаційну, науково-популярну або комунікаційну.

Крім того, визначається цільова аудиторія, її характеристики, рівень знань і технічних навичок, а також очікування від взаємодії з виданням. Такий аналіз дозволяє обґрунтовано підходити до структурування контенту та інтерактивних елементів.

На основі отриманих даних формується інформаційна архітектура видання. Вона визначає ієрархію контенту, логіку організації блоків та шляхи навігації користувача. При побудові архітектури важливо враховувати як лінійні, так і нелінійні сценарії використання, щоб користувач міг обирати індивідуальні маршрути взаємодії з матеріалом.

Для цього застосовуються карти сайту, діаграми взаємозв'язків та схеми user flow, які відображають порядок доступу до різних розділів і функцій. Однією з ключових практичних задач цього підрозділу є прототипування. На етапі створення прототипів визначаються розташування інформаційних блоків, кнопок, меню та інтерактивних елементів [25].

Прототипи можуть бути як статичними (малюнки та макети), так і інтерактивними, що дозволяє оцінити логіку навігації та загальне сприйняття користувачем. Це дає змогу на ранньому етапі виявити недоліки структури, запобігти дублюванню контенту та підвищити зручність взаємодії.

Особлива увага приділяється узгодженості контенту та навігації. Всі інформаційні елементи повинні мати чіткі зв'язки, а структура повинна відображати логіку мислення користувача. Для цього застосовуються методи когнітивного аналізу: тестування сценаріїв, картування користувацьких маршрутів та аналіз поведінки аудиторії. Такий підхід дозволяє забезпечити ефективне сприйняття інформації та оптимізувати взаємодію.

Таким чином, реалізація концепції та інформаційної архітектури є фундаментом для наступних етапів проектування. Саме на цьому етапі визначається, наскільки продукт буде зрозумілим, доступним та зручним для користувача, а також закладаються основи для інтеграції інтерактивності та мультимедійних елементів.

Інтерактивність, дизайн та технологічна реалізація.

Другий підрозділ практичної частини концентрується на створенні інтерактивного та візуально привабливого продукту, а також на його технологічній реалізації. Після формування інформаційної архітектури настає етап, коли структура контенту та сценарії взаємодії починають об'єднуватися з естетичними та функціональними елементами.

Інтерактивність реалізується через різні елементи: кнопки, посилання, меню, інтерактивні карти, відео та анімацію. Важливо, щоб всі елементи були не лише декоративними, а виконували функціональну роль – допомагали користувачу знаходити інформацію, навчатися чи взаємодіяти з контентом. Ефективна інтерактивність забезпечує активну участь користувача, підвищує залучення та сприяє кращому засвоєнню матеріалу.

На цьому ж етапі формується візуальний дизайн (UI) видання. Дизайн враховує графічний стиль, кольорову палітру, типографіку, макети сторінок та інтеграцію мультимедійних матеріалів. Візуальна ієрархія допомагає користувачу швидко орієнтуватися та сприймати інформацію, а гармонійне поєднання кольорів, шрифтів та графічних елементів створює приємне естетичне враження. Дизайн також тісно пов'язаний із UX: він не лише прикрашає продукт, а й оптимізує логіку взаємодії.

Наступний крок – технологічна реалізація. Тут обираються платформи та інструменти для створення видання, інтегрується контент та функціональні елементи. Продукт адаптується для різних пристроїв і екранів, забезпечується швидкість завантаження та стабільність роботи. На цьому етапі програмісти та дизайнери тісно співпрацюють, щоб забезпечити узгодженість інтерактивності, дизайну та контенту. Після створення прототипу проводиться тестування та оцінювання якості [26]. Воно включає юзабіліті-тестування, перевірку функціональності та аналіз взаємодії користувачів.

Тестування дозволяє виявити помилки, уточнити інтерактивні елементи та внести зміни до дизайну і структури, що підвищує ефективність продукту. Зібрані дані використовуються для вдосконалення видання перед його публікацією.

Завершальний етап – впровадження та супровід. Готове видання публікується в цифровому середовищі та постійно моніториться. Контент оновлюється, функціонал розширюється, а зміни впроваджуються на основі аналізу поведінки користувачів і зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє забезпечити тривалий життєвий цикл продукту, його актуальність та адаптивність до змін цифрового середовища.

Таким чином, об'єднання інтерактивності, дизайну та технологічної реалізації у рамках методології дозволяє створити мультимедійне видання, яке є функціонально ефективним, зручним для користувача, естетично привабливим та готовим до постійного розвитку.

Висновки

Дослідження підтвердило, що ефективне проектування мультимедійних видань у цифровому середовищі потребує комплексного, системного та користувач-орієнтованого підходу. Методологія, розроблена у межах роботи, поєднує концептуальне формування продукту, інформаційну архітектуру, UX та інтерактивність, візуальний дизайн та технологічну реалізацію, забезпечуючи цілісність і узгодженість всіх компонентів видання.

Визначено, що етапність та ітераційність процесу проектування дозволяє ефективно інтегрувати зворотний зв'язок і проводити оптимізацію продукту на всіх рівнях: від структури контенту до інтерактивності і дизайну. Це забезпечує гнучкість методології, її адаптивність до потреб аудиторії та змін у технологічному середовищі.

Практичне застосування методології показало, що комплексне поєднання концептуальної роботи, прототипування, інтерактивності та візуальної складової дозволяє створювати видання, які не лише інформують, але й залучають користувача, забезпечують зручну навігацію, логічність сприйняття та естетичну привабливість.

Запропонована методологія є універсальною та застосовною для різних типів мультимедійних видань – освітніх, науково-популярних, інформаційних і медійних. Вона підтримує масштабованість продукту, інтеграцію нових технологій і постійне оновлення контенту без втрати цілісності та логіки взаємодії.

Таким чином, результати дослідження створюють науково обґрунтовану основу для подальшого розвитку цифрових мультимедійних видань, забезпечують підвищення якості користувацького досвіду та формують фундамент для практичних і наукових розробок у сфері цифрових медіа та видавничої діяльності.

Список літератури.

1. Mayer, R.E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press.
2. Mayer, R.E., & Moreno, R. (1998). *A cognitive theory of multimedia learning: Implications for design principles*. Educational Technology Research and Development.

3. Burç Çeken, & Taşkın, N. (2022). Multimedia learning principles in different learning environments: A systematic review. *Smart Learning Environments*, 9(19). <https://doi.org/10.1186/s40561-022-00200-2>.
4. Xu, P. (2025). Digital media design and production method based on multimedia human–computer interaction technology. *Discover Artificial Intelligence*, 5, Article 13. <https://doi.org/10.1007/s44163-025-00232-w>.
5. Bohuslavskiy, M. (2024). Directions for the development of an effective method of studying user interfaces in multimedia. *Theory and Practice of Design*, (33), 122-128. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2024.33.13>.
6. Khynevych, R., Shaura, A., Romanchuk, V., Lavrusenko, S., & Shynkarov, V. (2025). Peculiarities of project-graphic modeling in the composition of multimedia objects. *Theory and Practice of Design*, (37), 451–458. <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.37.46>.
7. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskyi, O., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Formation of a typical form of an object image in a series of digital frames. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2(120)), 51-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266988>.
8. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Trunova, T., Troianskyi, V., Gerasimenko, R., & Shvedun, V. (2023). Improving the accuracy of identifying objects in digital frames using a procedure of full identification of measurements. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5(2(125)), 34-41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.288940>.
9. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Trunova, T., Shvedun, V., Postupna, O., & Tabakova, I. (2023). Development of a method for determining the aperture brightness of an object using a typical form of its image. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2(123)), 6-13. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.278367>.
10. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., Levykin, I., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023). Development of the matched filtration of a blurred digital image using its typical form. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9(121)), 62-71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273674>.
11. Deineko, Zh., Zeleniy, O., Lyashenko, V., & Tabakova, I. (2021). Color space image as a factor in the choice of its processing technology. *Problems of modern science and practice*. 389-394. <https://openarchive.nure.ua/handle/document/17676>.
12. Трунова, Т. О., & Хламов, С. В. (2025). Узгоджена фільтрація для обробки розмитого цифрового зображення. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Сучасні тренди: колективна монографія. Т. 1. (с. 171-190). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид». <https://doi.org/10.30837/PMW.2025.T1.171>.
13. Хламов, С.В., & Трунова, Т.О. (2025). Обробка цифрових зображень з використанням типової форми об'єктів. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Сучасні тренди: колективна монографія. Т. 1. (с. 191-213). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид». <https://doi.org/10.30837/PMW.2025.T1.191>.
14. Манскова, Ю.Ю., & Табакова, І.С. (2025). Фотореалістичні тривимірні інді-ігри. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*. Т. 6. (с. 586-588).
15. Шипова, М.К., & Вовк, О.В. (2020). Психоемоційний вплив кольору. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. Т. 2. (с. 11-13).
16. Чеботарьова, І.Б., & Табакова, І.С. (2017). Використання статистичних методів для оцінки та контролю якості поліграфічної продукції. *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології*. Т. 1. (с. 52-57). <https://openarchive.nure.ua/handle/document/20683>.
17. Ivaniuk, H.I., Kuzemko, L.V., & Novyk, I.M. (2020). Training program “Designing a multimedia environment...” as an instrument for future educators’ digital skills formation. *Information Technologies and Learning Tools*. <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/3901>.

18. Penteliuc Cotosman, D. (2009). The multimedia product: Between design and information, design and utility and design and entertainment. arXiv preprint. <https://arxiv.org/abs/0904.3693>.
19. Merkulova, S., & Pryshchenko, S. (2022). Visual aesthetics of digital media. *Research in Digital Visual Media*. https://www.researchgate.net/publication/375075496_Visual_Aesthetics_of_the_Digital_Media.
20. Khlamov, S., & Savanevych, V. (2020). Big astronomical datasets and discovery of new celestial bodies in the Solar System in automated mode by the CoLiTec software. In *Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation (1st ed.)*. Part IV, Chap. 18. (p. 331-345). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00030-8>.
21. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., Deineko, Z., & Lytvynenko, S. (2025). Analysis of performance metrics for load testing tools. In *Information control systems and intelligent technologies. Achievements and applications. Section 2 "Intelligent systems and data analysis"*. (p. 211-235). Liha-Pres. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-12>.
22. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., & Deineko, Z. (2025). Comparative analysis of JMeter and Postman for API-based performance testing. *CEUR Workshop Proceedings*, 4048, 426-440. <https://ceur-ws.org/Vol-4048/paper34.pdf>.
23. Роскошна, А.В., & Шипова, М.К. (2025). REN'PY як засіб розробки мультимедійних видань. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*. Т. 6. (с. 604-606).
24. Khlamov, S., Savanevych, V., Tabakova, I., Kartashov, V., Trunova, T., & Kolendovska, M. (2024). Machine vision for astronomical images using the modern image processing algorithms implemented in the CoLiTec software. *Measurements and Instrumentation for Machine Vision*. Chap. 12. (p. 269-310). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003343783-12>.
25. Мажуга, М. О., & Бокарева, Ю. С. (2016). Використання інтерактивної інфографіки при створенні електронного мультимедійного видання. *Поліграфічні, мультимедійні та web технології*. Т. 2. (с. 170-173).
26. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., Trunova, T., & Teslenko, Y. (2025). Performance percentile analysis for API-based testing. *Information control systems and intelligent technologies. Achievements and applications. Section 2 "Intelligent systems and data analysis"*. (p. 235-253). Liha-Pres. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-13>.

КОМПЕНСАЦІЙНА МОДЕЛЬ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ДРУКОВАНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ СЕНСОРІВ У БАГАТОРІВНЕВИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Пановик У.П.

к.т.н., доцент,

кафедра «Комп'ютерних технологій у видавничо-поліграфічних процесах»,

Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-9663-4328

***Анотація.** Досліджено друковані текстильні сенсори, сформовані методами друкованої електроніки, та особливості обробки їх сигналів у багаторівневих інформаційно-вимірювальних системах. Запропоновано математичну модель формування сигналу з урахуванням параметрів друкованого елемента, механічних деформацій і впливу середовища. Розроблено адаптивний алгоритм обробки сигналу, що забезпечує компенсацію шуму та дрейфу і підвищення точності вимірювань.*

***Ключові слова:** друковані текстильні сенсори, друкована електроніка, обробка сигналів, адаптивна модель, інформаційно-вимірювальні системи, імітаційне моделювання.*

Вступ

Сучасний розвиток інформаційних технологій характеризується інтеграцією цифрових рішень у фізичні об'єкти, що формує концепції інтернету речей (IoT) та кіберфізичних систем. У цьому контексті важливе місце займають носимі технології, які забезпечують безперервний збір, передачу та аналіз даних. Одним із перспективних напрямів є Smart Textile – інтелектуальні текстильні матеріали, здатні виконувати сенсорні функції та взаємодіяти з користувачем. На відміну від традиційних електронних пристроїв, Smart Textile системи передбачають інтеграцію функціональних елементів безпосередньо у структуру матеріалу, що забезпечує гнучкість, ергономічність і можливість роботи в реальному часі. Це відкриває широкі перспективи їх застосування у медичних, спортивних, промислових і безпекових системах.

Ключовим напрямом розвитку Smart Textile систем є перехід від дискретної інтеграції електроніки до формування функціональних структур безпосередньо на текстильних носіях. У цьому контексті важливу роль відіграють технології друкованої електроніки, які забезпечують нанесення провідних і сенсорних елементів на тканину, масштабованість виробництва та створення багатофункціональних сенсорних систем. Разом з тим, залишається низка проблем, пов'язаних із забезпеченням стабільності роботи таких систем у реальних умовах. Основний вплив на характеристики сенсорів мають механічні деформації, температурно-вологісні зміни та нестабільність електричних

контактів. Додаткову складність становить інтеграція даних у інформаційно-вимірювальні системи, що потребує узгодження процесів збору, передачі, обробки та візуалізації інформації.

Сучасні дослідження Smart Textile систем охоплюють розроблення матеріалів, інтеграцію електроніки та створення сенсорних структур у складі носимих систем. Значна частина робіт розглядає електронний текстиль (e-textiles) як багаторівневу систему, що включає волокна, нитки, тканини та інтегровані електронні компоненти [1–3], підкреслюючи роль ієрархічної організації текстильних структур у забезпеченні механічних властивостей і можливості інтеграції функціональних елементів [3]. Окрему увагу приділено інтеграції мікроелектроніки у текстильні середовища, зокрема проблемам надійності контактів і стійкості до деформацій [4, 5]. Показано, що інтерфейс «тканина–електроніка» є критичним елементом, який визначає стабільність передачі сигналу та довговічність системи [4].

Сучасні дослідження значною мірою зосереджені на технологіях друкованої електроніки як основі формування функціональних елементів на текстильних носіях. Розглядаються методи нанесення провідних і сенсорних матеріалів, що забезпечують створення гнучких електричних структур безпосередньо на тканині та можливість масштабування і інтеграції функцій [6, 7]. У дослідженнях текстильних сенсорів особлива увага приділяється пристроям для моніторингу фізіологічних параметрів (температура, тиск, деформації, серцевий ритм) [8, 9]. Сучасні підходи орієнтовані на інтегровані та мультимодальні сенсорні системи, здатні одночасно реєструвати кілька параметрів і працювати в режимі реального часу [10, 11].

Розвиток сенсорних технологій супроводжується формуванням інтегрованих систем моніторингу, у яких текстильні сенсори виступають первинним рівнем збору даних. У таких системах розглядаються питання передачі інформації, взаємодії з мобільними пристроями та інтеграції з цифровими сервісами [9, 11], а також створення інтелектуальних рішень із адаптивною взаємодією з користувачем. Попри значний прогрес, залишаються невирішені проблеми, зокрема обмежена довговічність, нестабільність електричних характеристик у змінних умовах і складність масштабування виробництва [5, 12]. Крім того, більшість підходів зосереджена на окремих компонентах, тоді як питання комплексної інтеграції всіх рівнів системи залишаються недостатньо опрацьованими [1, 6].

Незважаючи на активний розвиток Smart Textile систем, сучасні підходи до їх створення залишаються фрагментованими та орієнтованими переважно на окремі компоненти, тоді як питання їх комплексної інтеграції в межах єдиної інформаційно-вимірювальної системи розглядається недостатньо системно. Властивості текстильного середовища, зокрема гнучкість і чутливість до зовнішніх факторів, зумовлюють нестабільність електричних характеристик сенсорів і зниження точності вимірювань. Додатковою проблемою є відсутність узагальненого підходу до побудови архітектури таких систем, що охоплював би

всі етапи – від формування сенсорних структур до передачі, обробки та візуалізації даних. Це ускладнює створення масштабованих і надійних рішень, що визначає актуальність розроблення комплексного підходу до побудови друкованих текстильних сенсорних систем.

Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є розроблення узагальненого підходу до створення текстильних сенсорних систем на основі технологій друкованої електроніки з їх подальшою інтеграцією в інформаційно-вимірювальні системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати аналіз сучасних Smart Textile систем із визначенням основних напрямів їх розвитку та обмежень, дослідити технології друкованої електроніки для формування сенсорних структур на текстильних носіях і особливості інтеграції електронних компонентів у текстильне середовище. Необхідно розробити узагальнену архітектуру друкованої текстильної сенсорної системи з урахуванням багаторівневого функціонування, проаналізувати характеристики сигналів і визначити основні джерела похибок, а також розглянути методи їх обробки та фільтрації. Окрім цього, необхідно обґрунтувати підходи до передачі, обробки та візуалізації даних у складі інформаційно-вимірювальних систем.

Основна частина

Розвиток Smart Textile систем безпосередньо пов'язаний із формуванням нових підходів до організації носимих інформаційно-вимірювальних рішень, орієнтованих на інтеграцію цифрових технологій у повсякденне середовище людини. У цьому контексті ключовою є концепція Smart Body, яка визначає напрям використання текстильних сенсорних систем як складової частини комплексних цифрових рішень.

Концепція Smart Body формується на перетині розвитку носимих електронних систем, інтернету речей та сенсорних технологій і передбачає інтеграцію функціональних елементів безпосередньо у середовище взаємодії з людиною. У межах цієї концепції тіло людини розглядається як платформа для безперервного збору, передачі та інтерпретації даних, що відображають фізіологічний стан, рівень активності та параметри навколишнього середовища.

На відміну від традиційних підходів, де сенсорні пристрої реалізуються у вигляді окремих електронних модулів, концепція Smart Body орієнтована на їх інтеграцію у повсякденні об'єкти, передусім у текстильні вироби. Такий підхід забезпечує природність взаємодії користувача з системою, мінімізацію втручання у його діяльність та можливість тривалого моніторингу без необхідності використання спеціалізованих пристроїв.

Функціональна структура Smart Body систем включає декілька взаємопов'язаних рівнів: сенсорний рівень, на якому здійснюється реєстрація

фізичних або біофізичних параметрів; рівень первинної обробки сигналів, що забезпечує перетворення та підготовку даних; комунікаційний рівень, відповідальний за передачу інформації; а також рівень візуалізації та інтерпретації результатів. Така багаторівнева організація визначає необхідність узгодження різних технологічних компонентів у межах єдиної системи.

Особливе місце в реалізації концепції Smart Body займають текстильні сенсорні системи, які дають можливість поєднати функції носія та вимірювального елемента. Інтеграція сенсорів у текстильні структури відкриває можливості для створення гнучких і адаптивних систем, здатних функціонувати в умовах постійних механічних впливів та змін середовища. При цьому текстиль виступає не лише як пасивна основа, але як активний компонент системи, що впливає на характеристики сигналів та ефективність їх передачі.

Подальший розвиток концепції Smart Body безпосередньо пов'язаний із формуванням понятійного апарату, що описує інтеграцію електронних функцій у текстильні матеріали. У науковій літературі для позначення таких систем використовуються терміни *Smart Textile* та *e-textiles*, які, незважаючи на схожість, відображають різні рівні функціональності та інтеграції.

Під терміном *e-textiles* (electronic textiles) зазвичай розуміють текстильні матеріали, в які інтегровані електронні компоненти або провідні елементи, що забезпечують виконання окремих функцій, таких як передача сигналів, нагрівання або реєстрація параметрів. У цьому випадку текстиль виступає як носій або середовище розміщення електроніки, а функціональність системи визначається переважно характеристиками інтегрованих компонентів. Натомість поняття *Smart Textile* має ширший зміст і охоплює системи, здатні не лише реєструвати сигнали, але й здійснювати їх обробку, адаптацію та взаємодію з користувачем або зовнішніми системами. У таких матеріалах текстильна структура стає активним елементом системи, що бере участь у формуванні, передачі та перетворенні інформації. Таким чином, Smart Textile системи характеризуються наявністю функціональної інтеграції на рівні матеріалу, а не лише на рівні доданих електронних модулів.

Важливою ознакою Smart Textile є рівень інтеграції функціональних елементів, який може реалізовуватися на різних структурних рівнях текстилю: на рівні волокон, ниток, тканин або поверхневих шарів. Залежно від цього виділяють декілька підходів до створення таких систем: інтеграція готових електронних компонентів у текстильну структуру; формування провідних і сенсорних елементів безпосередньо в процесі виготовлення текстилю; а також використання технологій нанесення функціональних матеріалів, зокрема методів друкованої електроніки.

З позиції функціональності Smart Textile системи доцільно розглядати як багаторівневі структури, що включають сенсорний рівень, рівень передачі сигналів та рівень обробки даних. При цьому текстиль може виконувати одночасно декілька ролей: механічного носія, провідного середовища та

сенсорного елемента. Така багатофункціональність відрізняє Smart Textile від традиційних матеріалів і визначає специфіку їх проектування та використання.

Сучасні Smart Textile системи вже реалізовані у вигляді комерційних рішень для моніторингу фізіологічних параметрів і рухової активності, що демонструє можливості інтеграції сенсорів у текстильні вироби. Показовим прикладом є система Hexoskin – «розумний» одяг із вбудованими сенсорами серцевого ритму, дихання та активності, які інтегровані у тканину та працюють разом із електронним модулем обробки і передачі даних до мобільних або хмарних сервісів у режимі реального часу.

Іншим прикладом є система Sensoria, орієнтована на аналіз рухової активності, зокрема параметрів ходи та бігу. Сенсори інтегруються у текстиль (наприклад, шкарпетки) та забезпечують визначення розподілу тиску і характеристик контакту стопи з поверхнею, а обробка даних здійснюється через мобільні додатки. Окрім цього, є рішення для медичного, спортивного та промислового моніторингу, які відрізняються типами сенсорів, способами інтеграції та архітектурою. У більшості випадків застосовується гібридний підхід, коли текстиль виконує сенсорну функцію, а обробка сигналів здійснюється окремим електронним модулем.

Для узагальнення характеристик наявних Smart Textile систем доцільно провести їх порівняння за ключовими параметрами, що визначають ефективність функціонування (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння сучасних Smart Textile систем

Система	Тип виробу	Вимірювані параметри	Спосіб інтеграції	Обробка даних	Особливості
Hexoskin	Футболка	ЧСС, дихання, активність	Вбудовані сенсори та модуль	Мобільний/хмарний	Безперервний моніторинг
Sensoria	Шкарпетки	Тиск, параметри ходи	Текстильні сенсори та модуль	Мобільний додаток	Аналіз руху
Інші системи	Одяг/аксесуари	Температура, рух, біометрія	Гібридна інтеграція	Зовнішні системи	Залежить від задачі

Аналіз наявних рішень показує, що сучасні Smart Textile системи здебільшого реалізуються як гібридні структури, у яких текстильні сенсори поєднуються з окремими електронними модулями. Такий підхід спрощує реалізацію систем, проте обмежує рівень інтеграції та створює додаткові вимоги до надійності з'єднань між текстильними та електронними компонентами. Крім того, більшість присутніх систем орієнтована на вирішення конкретних прикладних задач і не забезпечує універсального підходу до побудови текстильних сенсорних систем. Це ускладнює їх масштабування та адаптацію до інших сфер застосування.

Незважаючи на активний розвиток Smart Textile систем та наявність комерційно реалізованих рішень, їх широке впровадження обмежується низкою технологічних, конструктивних та експлуатаційних факторів. Аналіз сучасних

систем свідчить про наявність системних обмежень, що виникають на різних рівнях їх побудови – від матеріального до інформаційного.

Однією з основних проблем є нестабільність електричних характеристик текстильних сенсорів, зумовлена гнучкістю, деформацією та неоднорідністю текстильного середовища, а також впливом зовнішніх факторів. Це призводить до зміни параметрів сенсорних елементів, зниження точності вимірювань і ускладнення відтворюваності результатів. Додаткові обмеження пов'язані з надійністю інтерфейсу «тканина–електроніка», який має забезпечувати одночасно електричну провідність і механічну стійкість. Недостатня надійність таких з'єднань може спричинити втрату сигналу та деградацію функціонування системи. Суттєві обмеження пов'язані з технологіями формування функціональних структур на текстильних матеріалах. Властивості текстильних носіїв (пористість, шорсткість, вбирання) впливають на якість нанесення провідних шарів, їх геометрію та електричні характеристики, що визначає ефективність роботи сенсорів. Додатковою проблемою є енергозабезпечення систем, оскільки інтеграція джерел живлення у текстиль ускладнюється вимогами гнучкості, безпеки та зручності. Тому у більшості рішень використовуються зовнішні або знімні модулі, що знижує рівень інтеграції.

На рівні обробки даних і інтеграції в інформаційні системи також спостерігається ряд обмежень. Нестабільність сигналів, наявність шумів та варіацій параметрів сенсорів ускладнюють застосування стандартних методів обробки інформації. Це вимагає використання адаптивних алгоритмів та спеціалізованих підходів до аналізу даних, які враховують специфіку текстильних сенсорних систем.

Результати аналізу сучасних Smart Textile систем показали, що ключовим фактором їх розвитку є можливість інтеграції функціональних елементів безпосередньо у текстильні матеріали. При цьому традиційні підходи до побудови електронних систем, що базуються на використанні дискретних компонентів і жорстких підкладок, є обмеженими з точки зору гнучкості, адаптивності та сумісності з текстильним середовищем. У зв'язку з цим особливого значення набувають технології друкованої електроніки, які забезпечують формування електронних структур шляхом нанесення функціональних матеріалів безпосередньо на поверхню або в структуру текстильного носія. Такий підхід дає змогу перейти від монтажу окремих компонентів до створення інтегрованих функціональних елементів, що є складовою частиною матеріалу.

Основним принципом друкованої електроніки є адитивне формування електронних структур, при якому провідні, напівпровідникові або сенсорні матеріали наносяться у вигляді тонких шарів відповідно до заданої геометрії. Функціональні властивості сформованих елементів визначаються як характеристиками матеріалів, так і параметрами процесу нанесення, включаючи товщину шару, рівномірність покриття та якість адгезії до підкладки.

На відміну від субтрактивних технологій, що передбачають видалення матеріалу для формування структури, друкована електроніка базується на локалізованому додаванні матеріалу лише в необхідних ділянках. Це забезпечує зменшення втрат матеріалів, спрощення технологічного процесу та можливість роботи з гнучкими і пористими носіями, зокрема текстильними.

Технологічний процес друкованої електроніки включає декілька взаємопов'язаних етапів: підготовку текстильного носія, нанесення функціонального матеріалу, його фіксацію (сушіння або полімеризацію) та формування стабільної електронної структури. Кожен із цих етапів має суттєвий вплив на кінцеві характеристики сенсорних елементів, особливо з урахуванням специфіки текстильного середовища (рис. 1).

ПІДГОТОВКА ТЕКСТИЛЬНОГО НОСІЯ	НАНЕСЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ	ФІКСАЦІЯ ТА СТАБІЛІЗАЦІЯ	ФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВОЇ СТРУКТУРИ
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Очищення поверхні</i> • <i>Функція:</i> видалення забруднень, підвищення адгезії матеріалів 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Методи:</i> трафаретний друк (screen printing); струминний друк (inkjet printing); флексографічний друк (flexographic printing) • <i>Функція:</i> формування провідних або сенсорних елементів 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Методи:</i> сушіння; термообробка; УФ-полімеризація • <i>Функція:</i> закріплення матеріалу, формування електричних властивостей 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Операції:</i> нанесення наступних шарів вирівнювання стабілізація • <i>Функція:</i> створення повноцінної електронної структури

Рисунок 1 – Принцип формування електронних структур методами друкованої електроніки

Важливою особливістю є те, що методи друкованої електроніки базуються на технологічних принципах, близьких до поліграфічного виробництва. Використання процесів нанесення шарів, контроль товщини покриття та формування структур за допомогою друкарських технологій дозволяє розглядати друковану електроніку як розвиток поліграфічних процесів у напрямі створення функціональних матеріалів і електронних систем.

Розглянуті принципи друкованої електроніки реалізуються на практиці за допомогою конкретних технологічних методів нанесення функціональних матеріалів. Саме вибір методу друку визначає точність формування електронних структур, товщину функціональних шарів, а також їх електричні та механічні властивості. У випадку текстильних носіїв цей вибір додатково ускладнюється специфікою поверхні матеріалу, зокрема її пористістю, шорсткістю та здатністю до деформації. Серед найбільш поширених методів друку, що застосовуються у друкованій електроніці для створення текстильних сенсорних систем, виділяють трафаретний, струминний та флексографічний друк (рис. 2). Кожен із цих методів характеризується власними технологічними особливостями, що визначають область його ефективного застосування (табл. 2).

Трафаретний друк (screen printing) є одним із найбільш поширених методів завдяки можливості нанесення товстих шарів функціональних матеріалів із високою концентрацією провідних частинок. Це дає можливість формувати елементи з низьким електричним опором, що є важливим для сенсорних та провідних структур. Крім того, цей метод добре адаптується до текстильних поверхонь, однак обмежується відносно невисокою роздільною здатністю.

Струминний друк (inkjet printing) забезпечує високу точність нанесення матеріалу та можливість формування дрібних геометричних структур без використання друкарських форм. Це робить його придатним для створення складних сенсорних елементів. Водночас ефективність цього методу значною мірою залежить від властивостей чорнил і рівномірності їх розподілу на текстильній поверхні, що може бути обмежуючим фактором.

Флексографічний друк (flexographic printing) орієнтований на високошвидкісне виробництво та добре підходить для масштабованих технологічних процесів. Завдяки використанню гнучких друкарських форм цей метод може застосовуватися для обробки рулонних текстильних матеріалів, що є важливим для промислового виробництва Smart Textile систем. Разом з тим, забезпечення стабільних електричних характеристик потребує точного контролю технологічних параметрів.



Рисунок 2 – Методи друку в друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем

Таблиця 2 – Порівняння методів друку в друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем

Метод друку	Принцип нанесення	Переваги	Обмеження
Трафаретний (screen printing)	Продавлювання функціонального матеріалу через трафаретну форму	– можливість нанесення товстих шарів – низький електричний опір – технологічна простота	– обмежена роздільна здатність – складність формування дрібних елементів
Струминний (inkjet printing)	Безконтактне нанесення крапель матеріалу через сопла	– висока точність – відсутність друкарських форм – гнучкість у формуванні структур	– високі вимоги до чорнил – нерівномірність на пористих поверхнях
Флексографічний (flexographic printing)	Нанесення матеріалу за допомогою гнучкої друкарської форми (кліше)	– висока швидкість друку – придатність до рулонного виробництва – масштабованість	– складність налаштування процесу – обмежена точність для дрібних структур

Ефективність реалізації розглянутих методів друку в значній мірі визначається властивостями функціональних матеріалів, що використовуються

для формування електронних структур. Якщо технології друку задають геометрію та спосіб нанесення елементів, то саме матеріали визначають їх електричні, механічні та експлуатаційні характеристики. У контексті створення текстильних сенсорних систем це набуває особливого значення, оскільки матеріали мають бути сумісними з гнучкими та деформованими носіями.

Основу друкованої електроніки складають провідні матеріали, які використовуються для формування струмопровідних доріжок, електродів та сенсорних елементів (рис. 3). Найбільш поширеними є металеві чорнила, полімерні провідні композиції та вуглецеві матеріали, кожна з яких має свої особливості застосування. Металеві чорнила, зокрема на основі срібла, забезпечують високий рівень електропровідності та широко застосовуються для формування електричних з'єднань. Вони дають змогу отримувати стабільні провідні структури навіть при відносно невеликій товщині шару. Водночас їх використання обмежується високою вартістю та необхідністю забезпечення відповідних умов фіксації матеріалу.

Полімерні провідні матеріали характеризуються високою гнучкістю та кращою сумісністю з текстильними поверхнями. Вони можуть витримувати механічні деформації без значної втрати провідності, що є критично важливим для Smart Textile систем. Проте їх електропровідність, як правило, є нижчою порівняно з металевими матеріалами. Вуглецеві матеріали, зокрема графен та вуглецеві нанотрубки, поєднують хорошу провідність із механічною гнучкістю та стійкістю до зовнішніх впливів. Це робить їх перспективними для використання у сенсорних структурах, особливо у випадках, коли необхідна висока чутливість до змін параметрів середовища.

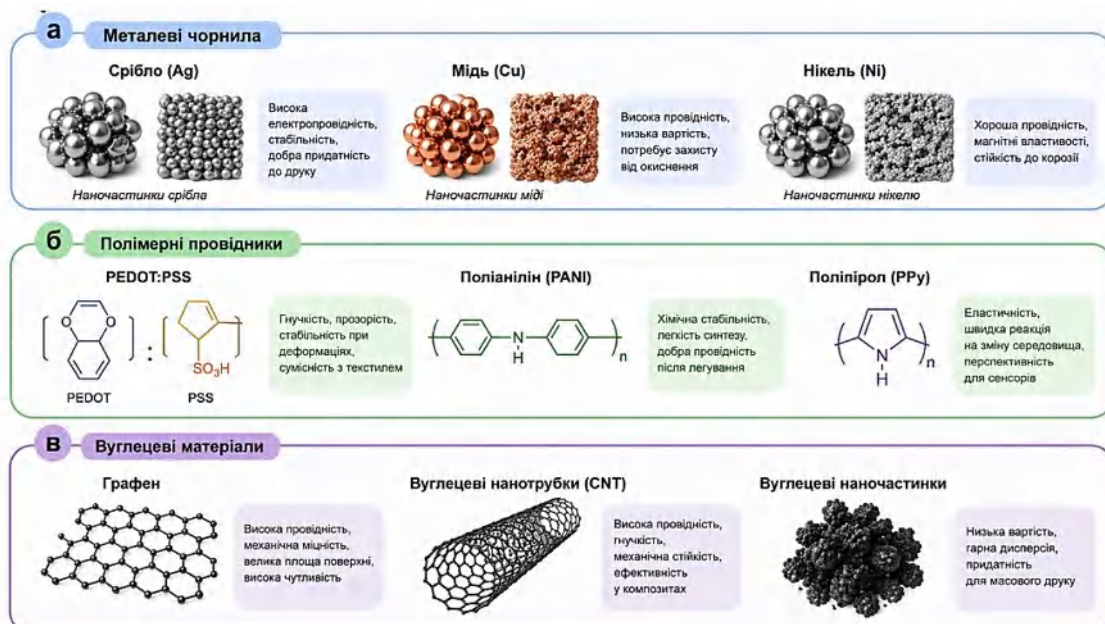


Рисунок 3 – Основні типи провідних матеріалів у друкованій електроніці для текстильних сенсорних систем: а) металеві чорнила; б) полімерні провідники; в) вуглецеві матеріали

Важливим аспектом є також реологічні властивості матеріалів, які визначають можливість їх використання у конкретних методах друку. В'язкість,

поверхневий натяг та здатність до змочування впливають на якість нанесення матеріалу, рівномірність шару та адгезію до текстильного носія. Таким чином, вибір матеріалу тісно пов'язаний із технологією друку і має здійснюватися з урахуванням їх взаємної сумісності (табл. 3).

Таблиця 3 – Характеристики основних провідних матеріалів у друкованій електроніці

Тип матеріалу	Приклади	Електропровідність	Сумісність з текстилем	Особливості
Металеві чорнила	Срібло (Ag), мідь (Cu)	Висока	Середня	Висока провідність, стабільність
Полімерні провідники	PEDOT:PSS	Середня	Висока	Гнучкість, стабільність при деформаціях
Вуглецеві матеріали	Графен, CNT	Середня/висока	Висока	Висока чутливість, перспективність

Розглянуті методи друку та провідні матеріали визначають технологічну основу створення електронних елементів, однак їх функціональне призначення реалізується лише на рівні сенсорних структур. Саме на цьому етапі відбувається перехід від пасивних провідних елементів до функціональних компонентів, здатних реагувати на зовнішні впливи та генерувати електричні сигнали.

Формування сенсорних структур у текстильних матеріалах базується на створенні конфігурацій провідних або функціональних шарів, параметри яких змінюються під дією фізичних величин. До таких величин належать механічні деформації, тиск, температура, вологість та інші фактори, характерні для середовища експлуатації Smart Textile систем. У більшості випадків сенсорна функція реалізується через зміну електричних характеристик – опору, ємності або провідності. Найбільш поширеним є підхід до формування резистивних сенсорів, у яких провідні елементи створюються шляхом нанесення функціональних матеріалів на текстильну основу відповідно до заданої геометрії. Електричний опір такого елемента визначається співвідношенням:

$$R = \rho \cdot L / A, \quad (1)$$

де R – електричний опір;
 ρ – питомий опір матеріалу;
 L – довжина провідного елемента;
 A – площа його поперечного перерізу.

У процесі деформації текстильного матеріалу змінюються геометричні параметри провідного шару або структура контактів між частинками матеріалу, що призводить до зміни опору. Відносна зміна опору може бути описана як:

$$\Delta R / R = k \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

де ε – відносна деформація;
 k – коефіцієнт чутливості сенсора.

Така залежність лежить в основі роботи сенсорів деформації та тиску.

Іншим поширеним типом є ємнісні сенсорні структури, що формуються у вигляді багат шарових систем із двома провідними електродами та діелектричним шаром між ними. Ємність такої структури визначається співвідношенням:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S / d, \quad (3)$$

де C – ємність;
 ε_0 – електрична стала;
 ε_r – відносна діелектрична проникність середовища;
 S – площа електродів;
 d – відстань між ними.

Під дією зовнішнього тиску або деформації текстильного матеріалу відбувається зміна відстані між електродами або властивостей діелектрика, що призводить до зміни ємності. Це дає можливість використовувати такі структури для реєстрації дотику, тиску або руху.

Окрему групу становлять сенсорні структури, функціонування яких базується на зміні електропровідності матеріалу під впливом зовнішніх факторів. У цьому випадку залежність може бути узагальнено подана як:

$$\sigma = f(X), \quad (4)$$

де σ – електропровідність;
 X – зовнішній вплив (вологість, температура, концентрація газів тощо).

Такі сенсори широко застосовуються для моніторингу параметрів навколишнього середовища.

Особливістю формування сенсорних структур у текстильних системах є необхідність врахування механічної поведінки носія. Деформації, згинання та розтягнення можуть впливати як на геометрію провідних елементів, так і на внутрішню структуру матеріалу, що визначає стабільність сенсорних характеристик. Тому при проектуванні сенсорів необхідно забезпечити баланс між електричними властивостями, чутливістю та механічною стійкістю.

Таким чином, формування сенсорних структур у друкованій електроніці є процесом, що поєднує технологічні можливості методів друку, властивості матеріалів та фізичні принципи перетворення сигналів. Отримані структури виступають базовими елементами інформаційно-вимірювальних систем, забезпечуючи перехід від фізичного впливу до електричного сигналу (рис. 4).

Для узагальнення особливостей формування сенсорних структур доцільно представити відповідність між типом сенсора, фізичним впливом та електричними параметрами, що змінюються у процесі функціонування (табл. 4).

Розглянуті принципи формування сенсорних структур та їх математичний опис базуються на припущенні про стабільність геометричних і фізичних параметрів системи. Проте у випадку текстильних носіїв ці припущення не виконуються в повній мірі, що обумовлює суттєвий вплив середовища на функціональні характеристики сенсорів.

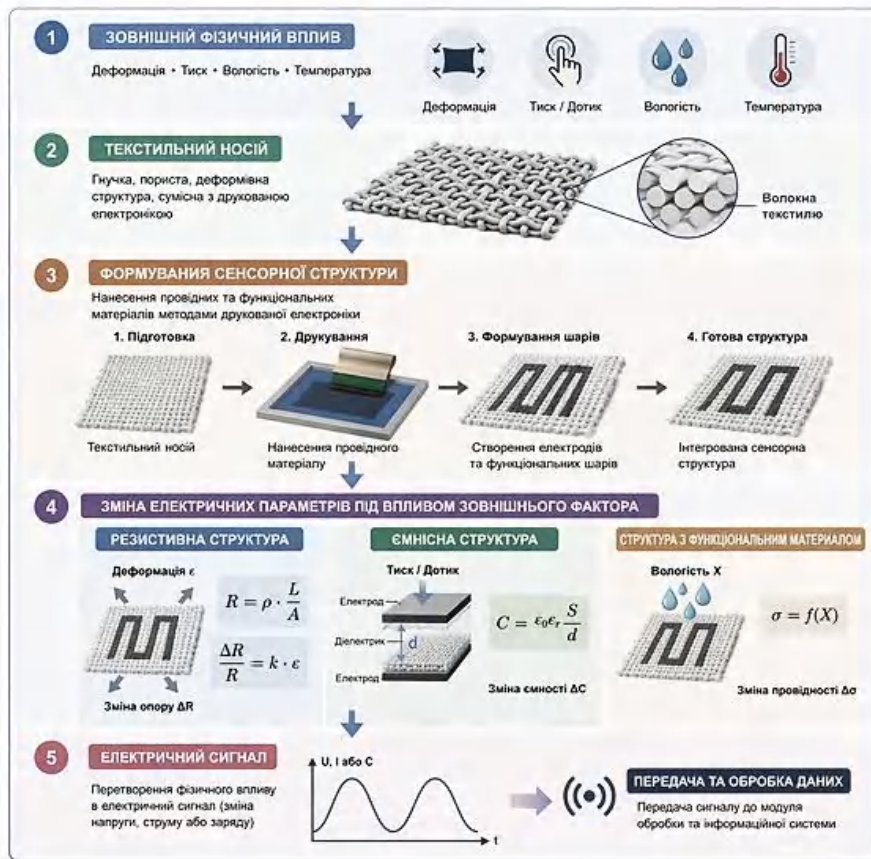


Рисунок 4 – Принципи формування друкованих сенсорних структур у текстильних системах

Таблиця 4 – Відповідність типу сенсорної структури, електричних параметрів та функціонального призначення

Тип сенсорної структури	Фізичний вплив	Змінюваний параметр	Типова конфігурація	Область застосування
Резистивна (strain/pressure)	Деформація, тиск	Опір R	Провідні доріжки, сітки	Моніторинг руху, біомеханіка
Ємнісна	Тиск, дотик	Ємність C	Два електроди та діелектрик	Сенсорні поверхні, wearable UI
П'єзорезистивна	Деформація	Опір R (нелінійна зміна)	Композитні матеріали	Високочутливі датчики тиску
Гігроскопічна	Вологість	Провідність σ	Полімерні/вуглецеві шари	Контроль мікроклімату
Температурна	Температура	Опір $R(T)$	Металеві/полімерні плівки	Біомоніторинг, медицина

Текстильні матеріали характеризуються складною внутрішньою структурою, що включає волокна, між волоконні пори та неоднорідні контактні області. Така структура зумовлює нестабільність електричних параметрів провідних і сенсорних елементів, особливо при зміні умов експлуатації. У результаті реальні залежності, наведені у попередньому підпункті, набувають вигляду функцій з додатковими змінними:

$$R = f(\varepsilon, T, H, t), \quad C = f(d, \varepsilon_r, P, H), \quad (5)$$

де T – температура;
 H – вологість;
 P – тиск;
 t – час експлуатації.

Одним із основних факторів є механічна деформація текстильного носія. Розтягнення, згинання та скручування призводять до зміни геометрії провідних елементів, а також до перебудови контактів між частинками провідного матеріалу. Це викликає не лише зміну електричного опору, але й появу гістерезису та нелінійності у характеристиках сенсора.

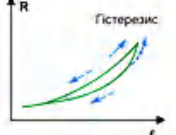
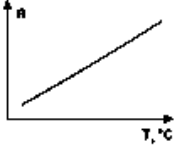
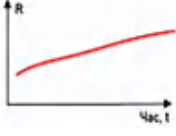
Вологість є ще одним критичним фактором, що впливає на роботу текстильних сенсорних систем. Поглинання вологи текстильними волокнами змінює їх діелектричні властивості, що особливо важливо для ємнісних сенсорів. Крім того, волога може впливати на провідність матеріалів, що призводить до дрейфу сигналу. Температурні зміни впливають як на електропровідність матеріалів, так і на механічні властивості текстильного носія. У результаті змінюються параметри сенсорних структур, що може призводити до похибок вимірювання. Для резистивних сенсорів це може бути описано як:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T), \quad (6)$$

де α – температурний коефіцієнт опору.

Окрім зовнішніх факторів, значний вплив має часовий аспект експлуатації. Повторні механічні навантаження, старіння матеріалів та деградація провідних шарів призводять до поступової зміни характеристик сенсорів. Це обумовлює необхідність врахування фактору стабільності та довговічності при проектуванні систем (табл. 5).

Таблиця 5 – Основні фактори впливу текстильного середовища на друковані сенсорні характеристики

Фактор	Вплив на структуру	Вплив на параметри	Наслідок
Деформація	Зміна геометрії та контактів провідних елементів	Нелінійна зміна опору: ΔR , ΔC	Нелінійність, гістерезис 
Вологість	Зміна діелектричних властивостей та провідності	Збільшення ємності: ΔC , $\Delta \sigma$	Дрейф сигналу 
Температура	Зміна електропровідності матеріалу	Зростання опору з температурою $R(T)$	Похибки вимірювання 
Час експлуатації (старіння)	Деградація матеріалу та зміна характеристик	Дрейф параметрів у часі	Зниження стабільності 

Друкована текстильна сенсорна система являє собою багаторівневу структуру, що забезпечує повний цикл обробки інформації – від реєстрації фізичного впливу до формування даних, придатних для аналізу та візуалізації. Така система поєднує у собі сенсорні елементи, електронні модулі, канали передачі даних та програмні компоненти (табл. 6). На базовому рівні структура системи включає текстильний сенсорний шар, який інтегрується безпосередньо у матеріал і виконує функцію первинного перетворення фізичних величин у електричні сигнали. Цей рівень характеризується високою чутливістю до зовнішніх впливів, але водночас є найбільш нестабільним через вплив текстильного середовища.

Таблиця 6 – Рівні архітектури текстильної сенсорної системи

Рівень системи	Функція	Основні компоненти
Сенсорний	Перетворення фізичного впливу у електричний сигнал	Друковані текстильні сенсори (тиск, деформація, температура, вологість)
Апаратний (електронний)	Підсилення, фільтрація та оцифрування сигналу	Мікроконтролер, підсилювач, фільтри, АЦП
Комунікаційний	Передача даних між модулями системи	BLE, Wi-Fi, провідні інтерфейси
Програмний	Обробка, аналіз і візуалізація даних	Мобільні додатки, сервери, аналітичні модулі
Інформаційний (системний)	Інтеграція, інтерпретація та прийняття рішень	Інформаційні системи, хмарні сервіси, UI

Наступним рівнем є електронний модуль, який виконує функції обробки сигналів, їх підсилення та перетворення у цифрову форму. Як правило, на цьому рівні використовуються мікроконтролери або спеціалізовані інтегральні схеми, що забезпечують первинну обробку даних та підготовку до передачі. Передача даних реалізується за допомогою бездротових або дротових каналів зв'язку. У сучасних Smart Textile системах переважають бездротові технології, такі як Bluetooth Low Energy або Wi-Fi, що забезпечують мобільність та зручність використання. Верхній рівень системи представлений програмним забезпеченням, яке здійснює обробку, аналіз та візуалізацію отриманих даних. Це можуть бути мобільні додатки, веб-інтерфейси або спеціалізовані інформаційні системи, що дозволяють інтерпретувати результати вимірювання.

Однією з ключових задач при розробленні текстильних сенсорних систем є інтеграція електронного модуля з текстильним носієм. На відміну від традиційних електронних систем, де компоненти розміщуються на жорстких друкованих платах, у Smart Textile системах необхідно забезпечити поєднання електроніки з гнучким, деформованим середовищем без втрати функціональності. Електронний модуль виконує функції підсилення, фільтрації, аналого-цифрового перетворення та передачі сигналів. Як правило, він реалізується на базі мікроконтролера з інтегрованими периферійними блоками, такими як АЦП, модулі зв'язку та інтерфейси підключення сенсорів. Основною вимогою до такого модуля є мінімізація розмірів, енергоспоживання та

забезпечення стабільної роботи в умовах механічних впливів. Побуває декілька підходів до інтеграції електронного модуля у текстильні системи (табл. 7).

Таблиця 7 – Порівняння підходів до інтеграції електронного модуля

Підхід	Переваги	Недоліки	Область застосування
Знімний модуль	Простота, ремонтпридатність	Додаткові з'єднання	Комерційні wearable
Часткова інтеграція	Менше контактів	Складність виготовлення	Дослідні системи
Повна інтеграція	Компактність	Технологічна складність	Перспективні рішення

Перший підхід передбачає використання окремого знімного електронного блока, який підключається до текстильного сенсорного шару через контактні з'єднання. Такий варіант є найбільш поширеним у сучасних комерційних рішеннях, оскільки дозволяє відокремити чутливу електроніку від текстильного середовища. Це спрощує обслуговування, заряджання та заміну компонентів.

Другий підхід полягає у частковій інтеграції електронних компонентів у структуру текстилю. У цьому випадку провідні доріжки формуються безпосередньо у тканині, а окремі компоненти (датчики, контакти) розміщуються у спеціальних зонах. Це дає можливість зменшити кількість зовнішніх з'єднань, однак ускладнює технологію виготовлення.

Третій підхід – повністю інтегровані системи, у яких електронні компоненти, включаючи мікросхеми, вбудовуються у текстильну структуру. Незважаючи на перспективність, цей підхід залишається обмеженим через складність реалізації, проблеми тепловідведення та забезпечення надійності.

Особливу роль відіграють інтерфейси з'єднання між текстильним сенсорним шаром і електронним модулем. Вони можуть бути реалізовані у вигляді гнучких контактів, провідних ниток або спеціальних конекторів (рис. 5). Надійність цих з'єднань безпосередньо впливає на якість сигналу та стабільність роботи системи.

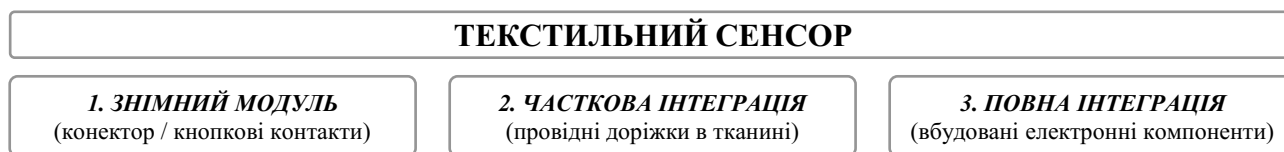


Рисунок 5 – Варіанти інтеграції електронного модуля у текстильні системи

Ефективність функціонування текстильних сенсорних систем значною мірою визначається якістю інтерфейсу між текстильним сенсорним шаром та електронним модулем. На відміну від традиційних електронних систем, де з'єднання реалізуються на жорстких друкованих платах, у Smart Textile системах необхідно забезпечити надійний електричний контакт у середовищі, що піддається постійним механічним деформаціям. Інтерфейс «тканина–електроніка» виконує функцію передачі електричних сигналів від сенсорних структур до електронного модуля, а також може забезпечувати живлення сенсорних елементів. При цьому він має відповідати ряду вимог, серед яких ключовими є

механічна гнучкість, стабільність контактів, низький електричний опір та стійкість до зовнішніх впливів.

Одним із найбільш простих способів реалізації інтерфейсу є використання провідних ниток, які інтегруються у текстильну структуру. Такі нитки можуть виконувати роль електричних з'єднань між сенсорами та електронним модулем. Перевагою цього підходу є його природна сумісність із текстильним середовищем, однак контактні характеристики можуть змінюватися під впливом деформацій. Іншим підходом є застосування друкованих провідних доріжок, сформованих безпосередньо на поверхні текстилю. Це дає можливість створювати більш контрольовані електричні з'єднання, однак такі структури можуть бути чутливими до механічних навантажень і зношування.

Для підключення електронного модуля часто використовуються спеціалізовані контактні елементи, такі як кнопкові з'єднання (snap connectors), гнучкі роз'єми або текстильні конектори. Вони забезпечують можливість знімного підключення електроніки, що є важливим з точки зору обслуговування та експлуатації виробу. У більш складних системах застосовуються гібридні інтерфейси, які поєднують декілька технологій, наприклад друковані доріжки та провідні нитки, що дає змогу підвищити надійність з'єднань та зменшити вплив механічних факторів (рис. 6).

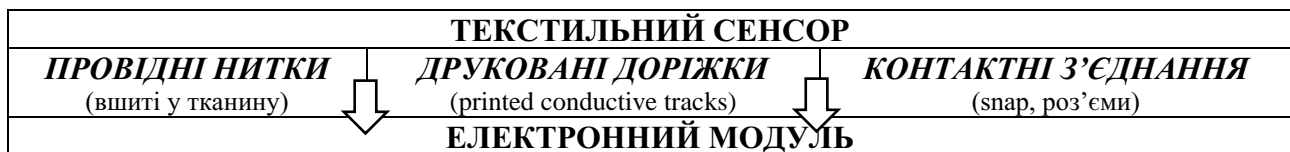


Рисунок 6 – Основні типи інтерфейсів «тканина–електроніка»

З точки зору електричних характеристик інтерфейс може бути описаний як додатковий елемент у вимірювальному колі, що вносить власний опір та шум:

$$R_{total} = R_{sensor} + R_{contact} + R_{interconnect}, \quad (7)$$

де $R_{contact}$ – опір контактів;

$R_{interconnect}$ – опір з'єднувальних елементів.

Нестабільність контактного опору, зумовлена деформаціями або зношуванням, може призводити до появи шумів і спотворення сигналу (табл. 8). Це особливо критично для сенсорів із малими рівнями сигналів, де навіть незначні зміни можуть впливати на результати вимірювання.

Таблиця 8 – Характеристики інтерфейсів «тканина–електроніка»

Тип інтерфейсу	Переваги	Недоліки	Особливості застосування
Провідні нитки	Гнучкість, інтеграція	Нестабільність контакту	Wearable системи
Друковані доріжки	Точність, контроль	Чутливість до деформацій	Сенсорні структури
Конектори	Надійність	Жорсткість	Знімні модулі
Гібридні рішення	Баланс характеристик	Складність	Просунуті системи

Після формування сенсорних структур та забезпечення надійного інтерфейсу «тканина–електроніка» наступним етапом є організація передачі даних у складі текстильної сенсорної системи. Саме комунікаційний рівень забезпечує інтеграцію Smart Textile рішень у інформаційно-вимірювальні системи, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг, аналіз та візуалізацію даних (рис. 7). Передача даних у таких системах здійснюється з урахуванням обмежень, пов'язаних із енергоспоживанням, габаритами електронного модуля та умовами експлуатації. У більшості випадків перевага надається бездротовим технологіям, які забезпечують мобільність і зручність використання.



Рисунок 7– Архітектура передачі даних у Smart Textile системі

Одним із найбільш поширених протоколів є Bluetooth Low Energy (BLE), який характеризується низьким енергоспоживанням та достатньою пропускну здатністю для передачі сенсорних даних. Це робить його оптимальним для wearable-пристроїв, зокрема текстильних сенсорних систем. BLE дозволяє реалізувати передачу даних у режимі реального часу з мінімальними витратами енергії. Іншим поширеним рішенням є використання технологій Wi-Fi, що забезпечують більшу швидкість передачі даних та можливість прямого підключення до мережі Інтернет. Проте такі системи характеризуються вищим енергоспоживанням, що обмежує їх застосування у автономних текстильних пристроях. У випадках, коли необхідна передача даних на великі відстані або у складних умовах, можуть використовуватися протоколи типу LoRaWAN або інші низькопотужні широкопasmові технології. Вони забезпечують значний радіус дії, але мають обмежену швидкість передачі.

Важливим аспектом є також енергетична ефективність передачі даних. Загальні витрати енергії можуть бути оцінені як:

$$E = P \cdot t, \quad (8)$$

де E – енергія;
 P – потужність передавача;
 t – час передачі.

Зменшення часу активної передачі та використання енергоефективних протоколів є ключовими факторами оптимізації системи.

Функціонування текстильних сенсорних систем супроводжується генерацією електричних сигналів, що відображають зміну фізичних параметрів середовища. На відміну від класичних сенсорних систем, у яких сигнал формується у відносно стабільних умовах, сигнали текстильних сенсорів характеризуються підвищеною варіативністю та залежністю від зовнішніх і внутрішніх факторів. Сигнали, що формуються текстильними сенсорами, можуть мати різну фізичну природу залежно від типу сенсорної структури. У резистивних сенсорах сигнал формується у вигляді зміни напруги або струму,

що обумовлено зміною електричного опору. У ємнісних сенсорах сигнал представлений зміною заряду або напруги, пов'язаною зі зміною ємності. У сенсорах на основі функціональних матеріалів сигнал може бути пов'язаний зі зміною провідності або генерацією електричного потенціалу. Загальна модель сигналу текстильного сенсора може бути представлена у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n(t), \quad (9)$$

де $x(t)$ – вимірний сигнал;
 $s(t)$ – корисний сигнал, що відповідає фізичному впливу;
 $n(t)$ – шумова складова.

Особливістю текстильних сенсорів є те, що шумова складова має складну структуру і може включати декілька компонентів: механічний шум, викликаний деформаціями тканини; електричний шум, пов'язаний з контактними опорами; зовнішні електромагнітні завади; температурні та вологісні впливи.

У результаті реальний сигнал може бути поданий як:

$$x(t) = s(t) + n_m(t) + n_e(t) + n_{env}(t), \quad (10)$$

де $n_m(t)$ – механічний шум;
 $n_e(t)$ – електричний шум;
 $n_{env}(t)$ – вплив середовища.

З точки зору часових характеристик сигнали текстильних сенсорів можуть бути як квазістатичними (наприклад, температура або вологість), так і динамічними (рух, деформація, пульс). Це визначає вимоги до частоти дискретизації та методів обробки.

Частота дискретизації має відповідати теоремі Найквіста:

$$f_s \geq 2 f_{max}, \quad (11)$$

де f_s – частота дискретизації;
 f_{max} – максимальна частота корисного сигналу.

Для більшості текстильних сенсорних систем значення f_{max} знаходиться в межах 1–50 Гц, що відповідає біомеханічним та фізіологічним процесам. Таким чином, частота дискретизації зазвичай обирається у діапазоні 50-200 Гц. Амплітуда сигналів текстильних сенсорів, як правило, є невеликою і може знаходитись у діапазоні від мікрвольт до мілівольт, що обумовлює необхідність використання підсилювачів та фільтрів.

Важливою характеристикою є також відношення сигнал/шум:

$$SNR = P_s / P_n, \quad (12)$$

де P_s – потужність корисного сигналу;
 P_n – потужність шуму.

Низьке значення SNR є типовим для текстильних сенсорів, що ускладнює процес обробки та аналізу даних. Отже, сигнали текстильних сенсорів характеризуються складною структурою, низьким рівнем сигналу та значним впливом шумів (рис. 8, табл. 9). Це обумовлює необхідність застосування спеціалізованих методів обробки сигналів.

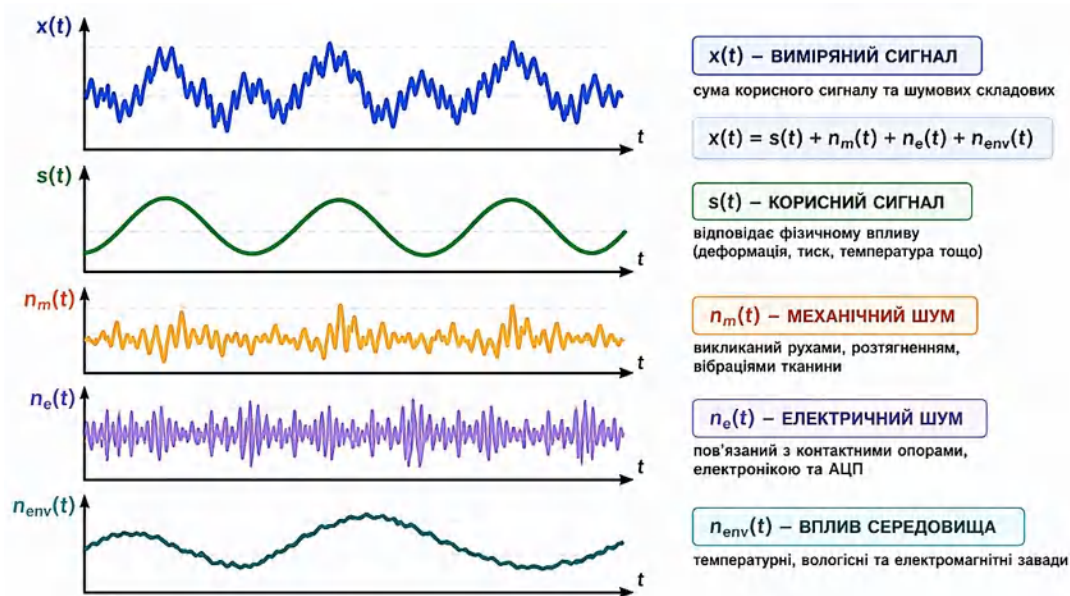


Рисунок 8 – Структура сигналу друкованого текстильного сенсора

Таблиця 9 – Основні характеристики сигналів друкованих текстильних сенсорів

Характеристика	Типове значення	Особливості
Частота сигналу	1-50 Гц	Біомеханічні процеси
Частота дискретизації	50-200 Гц	Згідно Найквіста
Амплітуда	1 мкВ – 10 мВ	Низький рівень
SNR	0-20 дБ	Високий рівень шуму
Тип сигналу	Аналоговий	Потребує АЦП

Однією з ключових особливостей текстильних сенсорних систем є наявність значної кількості похибок, які виникають на різних етапах формування та передачі сигналу. На відміну від традиційних вимірювальних систем, де умови функціонування є відносно стабільними, у Smart Textile системах похибки формуються під впливом як внутрішніх, так і зовнішніх факторів.

Загальна похибка вимірювання може бути представлена як сума окремих складових:

$$\Delta x = \Delta_{sens} + \Delta_{int} + \Delta_{env} + \Delta_{noise}, \quad (13)$$

- де Δ_{sens} – похибка сенсорного елемента;
 Δ_{int} – похибка інтерфейсу «тканина–електроніка»;
 Δ_{env} – вплив зовнішнього середовища;
 Δ_{noise} – шумові складові.

Похибки сенсорного рівня пов'язані з особливостями формування сенсорних структур та властивостями матеріалів. Основними причинами є неоднорідність нанесення провідних матеріалів; нестабільність контактів між частинками; деградація матеріалів у процесі експлуатації. У випадку резистивних сенсорів це може проявлятися у вигляді дрейфу опору:

$$R(t) = R_0 + \Delta R_{drift(t)}, \quad (14)$$

що призводить до поступового зміщення вимірюваного сигналу.

Інтерфейс «тканина–електроніка» є одним із найбільш нестабільних елементів системи. Контактні опори можуть змінюватися під впливом механічних деформацій, що призводить до появи додаткових *похибок інтерфейсу*:

$$\Delta U = I \cdot \Delta R_{contact}, \quad (15)$$

де $\Delta R_{contact}$ – зміна контактної опору.

Ці похибки мають випадковий характер і можуть бути джерелом імпульсних шумів.

Вплив зовнішнього середовища. Зовнішні фактори, такі як температура, вологість та електромагнітні завади, значною мірою впливають на роботу сенсорних систем. Зміна температури може викликати зміну електричних параметрів матеріалів:

$$\Delta R_T = \alpha \cdot R_0 \cdot \Delta T, \quad (16)$$

де α – температурний коефіцієнт.

Вологість впливає на діелектричні властивості текстилю, що особливо критично для ємнісних сенсорів.

Шумові складові. Шуми у текстильних сенсорних системах мають комплексну природу та включають термічний шум (Johnson noise); контактний шум; механічний шум (викликаний рухом тканини); електромагнітні завади.

Потужність теплового шуму може бути оцінена як:

$$P_n = k T B, \quad (17)$$

де k – стала Больцмана;

T – температура;

B – ширина смуги частот.

Особливістю текстильних сенсорних систем є те, що похибки (табл. 10) не є незалежними. Вони взаємодіють між собою, що ускладнює їх компенсацію. Наприклад, механічна деформація може одночасно впливати на сенсор, інтерфейс та контактні з'єднання.

У результаті реальний сигнал можна представити як:

$$x(t) = s(t) + \sum_i n_i(t) + \Delta(t), \quad (18)$$

де $\Delta(t)$ – сумарна похибка системи.

Таблиця 10 – Основні джерела похибок та їх характеристики

Джерело похибки	Причина	Тип похибки	Характер
Сенсор	Неоднорідність матеріалу	Систематична	Дрейф
Інтерфейс	Контактні опори	Випадкова	Імпульсна
Температура	Зміна параметрів	Систематична	Повільна
Вологість	Зміна діелектрика	Систематична	Нелінійна
Механіка	Деформації	Випадкова	Нестаціонарна
ЕМ завади	Зовнішні поля	Випадкова	Високочастотна

Складна структура сигналів текстильних сенсорів, наявність значної кількості шумових компонентів та нестабільність вимірюваних параметрів зумовлюють необхідність застосування ефективних методів фільтрації. Основною метою фільтрації є виділення корисного сигналу $s(t)$ з виміряного сигналу $x(t)$ та зменшення впливу шумових складових.

Загальна задача фільтрації може бути сформульована як перетворення:

$$y(t) = F\{x(t)\}, \quad (19)$$

де $y(t)$ – відфільтрований сигнал;

F – оператор фільтрації.

Для більшості текстильних друкованих сенсорних систем корисний сигнал має низькочастотний характер (1-50 Гц), тоді як значна частина шумів є високочастотною. Це дозволяє ефективно застосовувати *фільтри низьких частот* (Low-pass). У цифровому вигляді простий фільтр може бути реалізований як:

$$y[n] = \alpha x[n] + (1 - \alpha)y[n - 1], \quad (20)$$

де α – коефіцієнт згладжування.

Такий фільтр дозволяє зменшити високочастотні коливання сигналу, однак може призводити до затримки.

Одним із найпростіших і ефективних методів є *фільтр ковзного середнього* (Moving Average):

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n - i], \quad (21)$$

де N – розмір вікна.

Цей метод добре пригнічує випадковий шум, однак може згладжувати різкі зміни сигналу, що є критичним для динамічних процесів.

У випадках, коли відома частотна область корисного сигналу (наприклад, біомеханічні коливання), доцільно застосовувати *смугові фільтри* (Band-pass):

$$f_{low} \leq f \leq f_{high}. \quad (22)$$

Це дає можливість одночасно відсікати як низькочастотні дрейфи, так і високочастотні шуми.

У друкованих текстильних сенсорних системах параметри шумів можуть змінюватися у часі, тому статичні фільтри не завжди є ефективними. У таких випадках застосовуються адаптивні методи фільтрації, які змінюють свої параметри залежно від характеристик сигналу.

Загальна модель *адаптивного фільтра* може бути подана як:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M w_k[n] \cdot x[n-k], \quad (23)$$

де $w_k[n]$ – адаптивні коефіцієнти.

Для більш складних систем застосовується *фільтр Калмана*, який дозволяє оцінювати стан системи з урахуванням шумів:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - \hat{x}_{k-1}), \quad (24)$$

де K_k – коефіцієнт Калмана.

Цей метод є особливо ефективним для систем із високим рівнем шуму та нестабільними параметрами.

Вибір методу фільтрації залежить від характеру сигналу (стаціонарний / динамічний); рівня шуму; вимог до швидкодії системи; обчислювальних ресурсів електронного модуля (табл. 11). Для більшості друкованих текстильних сенсорних систем доцільно використовувати комбінований підхід, що поєднує прості фільтри (low-pass, moving average) із адаптивними методами.

Таблиця 11 – Порівняння методів фільтрації

Метод	Складність	Ефективність	Затримка	Придатність
Low-pass	Низька	Середня	Невелика	Базові системи
Moving Average	Низька	Висока	Середня	Шумозаглушення
Band-pass	Середня	Висока	Невелика	Частотні сигнали
Адаптивні	Висока	Дуже висока	Змінна	Динамічні системи
Калмана	Висока	Максимальна	Мінімальна	Прецизійні системи

Сигнали текстильних сенсорів формуються під впливом не лише зовнішніх факторів, але й внутрішніх параметрів сенсорного елемента, що визначаються технологією друкованої електроніки. Зокрема, геометричні характеристики провідних доріжок, товщина шару, питомий опір матеріалу та якість нанесення безпосередньо впливають на величину та стабільність сигналу.

У зв'язку з цим класичні методи фільтрації, які не враховують параметри сенсорного елемента, є недостатньо ефективними. Для підвищення точності вимірювання пропонується адаптивна модель обробки сигналу, що враховує як параметри друкованого елемента, так і вплив зовнішнього середовища.

З урахуванням параметрів сенсорної структури сигнал може бути представлений у вигляді:

$$x(t) = f(L, A, \rho, \varepsilon(t), T(t), H(t)) + n(t), \quad (25)$$

де L – довжина провідного елемента;

A – площа поперечного перерізу;
 ρ – питомий опір матеріалу;
 $\varepsilon(t)$, $T(t)$, $H(t)$ – зовнішні фактори.

Для компенсації впливу як геометричних, так і зовнішніх факторів пропонується модель:

$$y(t) = x(t) - f_1(L(t), A(t), \rho(t)) - f_2(\varepsilon(t), T(t), H(t)), \quad (26)$$

де f_1 – оцінка впливу параметрів друкованого елемента;

f_2 – оцінка впливу середовища.

У спрощеному вигляді:

$$f_1 = b_1 L(t) + b_2 A(t) + b_3 \rho(t), \quad (27)$$

$$f_2 = a_1 \varepsilon(t) + a_2 T(t) + a_3 H(t). \quad (28)$$

Реалізація запропонованої моделі (рис. 9) передбачає послідовну обробку виміряного сигналу з урахуванням двох груп чинників:

- параметрів друкованого сенсорного елемента;
- впливів зовнішнього середовища та умов експлуатації.

На відміну від звичайної схеми фільтрації, у запропонованому підході виконується не лише придушення шуму, а й компенсація відхилень, пов'язаних із геометрією сенсорної структури, електрофізичними властивостями матеріалу та дією зовнішніх факторів. Це дає змогу перейти від сирого виміряного сигналу до скоригованого сигналу, придатного для подальшого аналізу та візуалізації.

1. Ініціалізація параметрів системи. На початковому етапі задаються або зчитуються базові параметри друкованого сенсорного елемента: довжина провідної структури L_0 , площа поперечного перерізу A_0 , питомий опір матеріалу ρ_0 , а також початкові коефіцієнти адаптивної моделі a_i та b_i . Додатково встановлюються параметри попередньої фільтрації, частота дискретизації та порогові значення допустимих відхилень.

2. Зчитування вхідних даних. У поточний момент часу система отримує: сигнал із текстильного сенсора $x(t)$; дані про деформацію $\varepsilon(t)$; температуру $T(t)$; вологість $H(t)$. Таким чином, формується вектор поточного стану системи:

$$u(t) = \{x(t), \varepsilon(t), T(t), H(t), L(t), A(t), \rho(t)\}.$$

3. Попередня фільтрація сигналу. Для усунення високочастотних шумів та випадкових імпульсних сплесків застосовується фільтр низьких частот або ковзне середнє. У результаті формується згладжений сигнал:

$$x_f(t) = F_{LP}(x(t)).$$

На цьому етапі усуваються переважно випадкові шуми, але ще не компенсуються систематичні відхилення.

4. **Оцінка внеску параметрів друкованого елемента.** На основі геометричних та матеріальних параметрів сенсорної структури оцінюється складова сигналу, зумовлена особливостями друку та фізичною будовою елемента (27). У більш загальному випадку ця складова може бути нелінійною, однак для практичної реалізації на мікроконтролері доцільно використовувати лінійне наближення.

5. **Оцінка впливу зовнішнього середовища.** На основі поточних значень деформації, температури та вологості обчислюється компенсаційна складова, пов'язана із середовищем (28). Ця оцінка відображає внесок факторів, які змінюють електричні параметри сенсора в процесі експлуатації.

6. **Обчислення скоригованого сигналу.** Після оцінювання обох компенсаційних складових формується вихідний сигнал (26). Отриманий сигнал $y(t)$ є адаптивно скоригованим і містить менший рівень систематичних похибок порівняно з початковим виміром.

7. **Оцінка похибки моделі.** Якщо система має еталонне значення або прогнозовану оцінку сигналу, визначається похибка:

$$e(t) = x_f(t) - y(t).$$

У практичній реалізації похибка може визначатися також через відхилення від середнього, базової лінії або очікуваного діапазону зміни сигналу.

8. **Адаптація коефіцієнтів моделі.** Коефіцієнти a_i та b_i коригуються залежно від похибки, що дозволяє алгоритму підлаштовуватись під зміну умов роботи:

$$a_i(t+1) = a_i(t) + \mu e(t) u_i(t), \quad (29)$$

$$b_i(t+1) = b_i(t) + \mu e(t) v_i(t), \quad (30)$$

де $u_i(t)$ – чинники середовища;

а $v_i(t)$ – параметри друкованого елемента;

μ – коефіцієнт адаптації.

9. **Перевірка стабільності та достовірності результату.** На цьому етапі виконується контроль: виходу сигналу за допустимі межі; надмірної швидкості зміни коефіцієнтів; появи аномальних значень, що можуть бути зумовлені відмовою сенсора або контакту. У разі перевищення порогів можливе повторне калібрування або формування попередження.

10. **Передача результату в систему вищого рівня.** Скоригований сигнал $y(t)$ передається на наступний рівень архітектури: модуль аналізу, блок візуалізації або комунікаційний інтерфейс.

Узагальнено алгоритм може бути поданий так:

$$y(t) = F_{adapt}(x(t), L(t), A(t), \rho(t), \varepsilon(t), T(t), H(t)), \quad (31)$$

де F_{adapt} – оператор адаптивної обробки, що включає попередню фільтрацію, компенсацію параметрів друкованого елемента, компенсацію впливу середовища та оновлення коефіцієнтів моделі.

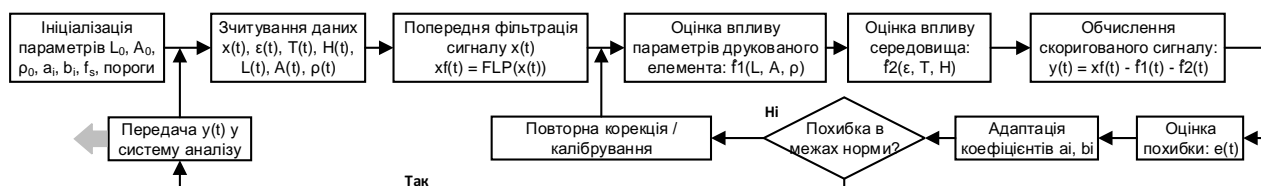


Рисунок 9 – Алгоритм адаптивної обробки сигналу друкованого текстильного сенсора

Запропоновано алгоритм адаптивної обробки сигналів текстильного сенсора, який, на відміну від класичних схем фільтрації, враховує не лише змінні фактори середовища, а й параметри друкованого сенсорного елемента – геометрію провідної структури та електрофізичні характеристики матеріалу.

Результати досліджень

У межах проведеного дослідження розглянуто конфігурацію друкованого текстильного сенсора резистивного типу, сформованого методом друкованої електроніки на гнучкій текстильній основі. Вибір резистивної сенсорної структури обумовлений її технологічною простотою реалізації, високою чутливістю до механічних деформацій та придатністю до інтеграції у текстильні матеріали.

Сенсорна структура реалізована у вигляді меандрової провідної доріжки, нанесеної на поверхню текстильного носія (рис. 10).

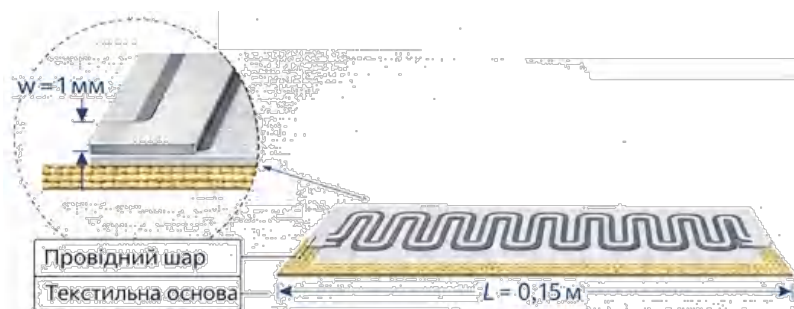


Рисунок 10 – Конфігурація друкованого текстильного сенсора з меандровою структурою

Така геометрія дозволяє збільшити ефективну довжину провідного елемента при обмежених габаритах, що підвищує чутливість сенсора до деформацій. Для моделювання було задано наступні параметри друкованого сенсорного елемента (табл. 12).

На основі цих параметрів базовий електричний опір сенсора визначається відповідно до виразу (1), що відповідає типовим значенням для друкованих провідних структур на текстильних матеріалах. У процесі експлуатації сенсор піддається механічним деформаціям, що призводить до зміни довжини провідного елемента та, відповідно, електричного опору, як у виразі (2). Для дослідження було прийнято значення коефіцієнта чутливості $k = 2$, що відповідає типовим характеристикам друкованих резистивних сенсорів.

Таблиця 12 – Параметри моделі друкованого текстильного сенсора

Параметр	Позначення	Значення
Довжина провідника	L	0,15 м
Ширина доріжки	w	1 мм
Товщина шару	h	20 мкм
Площа перерізу	A	$2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$
Питомий опір	ρ	$1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$
Чутливість	k	2

З урахуванням впливу температури та вологості, повний сигнал сенсора було представлено у вигляді:

$$x(t) = R_0(1 + k \varepsilon(t)) + \alpha T(t) + \beta H(t) + n(t),$$

де α , β – коефіцієнти впливу температури та вологості;
 $n(t)$ – шумова складова.

Отже, сформовано параметризовану модель друкованого текстильного сенсора, яка враховує як геометричні та матеріальні характеристики, так і вплив зовнішнього середовища. Отримана конфігурація використовується у подальшому для імітаційного моделювання сигналів та оцінки ефективності запропонованого алгоритму обробки.

У межах дослідження виконано імітаційне моделювання сигналу друкованого текстильного сенсора з урахуванням геометричних параметрів провідної структури, впливу механічної деформації та факторів зовнішнього середовища. Метою моделювання є формування сигналу, який максимально наближений до реальних умов експлуатації сенсорів, виготовлених методами друкованої електроніки. В якості базової моделі використано залежність електричного опору від геометричних параметрів провідного елемента (1), де зміна довжини $L(t)$ обумовлена деформацією текстильного носія. З урахуванням відносної деформації $\varepsilon(t)$ довжина провідного елемента може бути подана як:

$$L(t) = L_0(1 + \varepsilon(t)).$$

Відповідно, зміна опору сенсора описується співвідношенням:

$$R(t) = R_0(1 + k \cdot \varepsilon(t)).$$

Для моделювання сигналу було прийнято, що деформація має періодичний характер і описується гармонічною функцією:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi ft),$$

де $\varepsilon_0 = 0,02$ – амплітуда деформації;
 $f = 1$ Гц – частота.

Таким чином, базовий сигнал сенсора набуває вигляду:

$$s(t) = R_0(1 + k \varepsilon_0 \sin(2\pi ft)).$$

Для наближення до реальних умов до сигналу додано вплив температури та вологості:

$$s_{env}(t) = s(t) + \alpha T(t) + \beta H(t),$$

де $\alpha = 0,01$, $\beta = 0,002$.

Шумова складова сигналу моделюється як випадковий процес:

$$n(t) \sim N(0, \sigma^2),$$

де $\sigma = 0,01 - 0,05$ та визначає рівень шуму.

У результаті сформовано повний сигнал сенсора:

$$x(t) = s_{env}(t) + n(t),$$

який включає корисну складову (деформація), повільний дрейф (температура, вологість), випадковий шум.

У межах проведеного дослідження виконано імітаційне моделювання сигналу друкованого текстильного сенсора та здійснено його обробку із застосуванням базових і адаптивних методів. Метою аналізу є оцінка впливу різних підходів до обробки на якість сигналу, зокрема щодо зменшення шумової складової та компенсації дрейфу, спричиненого зміною параметрів середовища.

Сформований сигнал $x(t)$ характеризується наявністю трьох основних складових: корисної періодичної компоненти, зумовленої деформацією сенсора, повільного дрейфу, спричиненого температурою та вологістю, а також випадкової шумової складової. У часовій області це проявляється у вигляді коливань сигналу з накладеними випадковими відхиленнями та зміщенням базового рівня. Застосування фільтра низьких частот дозволило зменшити амплітуду високочастотного шуму, однак не забезпечило усунення низькочастотного дрейфу. Крім того, у відфільтрованому сигналі спостерігається згладжування піків та незначна фазова затримка, що впливає на точність відтворення динамічних змін.

Використання запропонованого адаптивного алгоритму, який враховує параметри друкованого сенсорного елемента та вплив середовища, дозволило суттєво покращити якість сигналу. Зокрема, спостерігається стабілізація базової лінії, зменшення шумової складової та відновлення амплітудних характеристик корисного сигналу. Отриманий сигнал $y(t)$ має виражену періодичну структуру, що відповідає заданій деформації, без суттєвих спотворень.

Для кількісної оцінки ефективності обробки проведено аналіз основних параметрів сигналу, включаючи середньоквадратичне відхилення шуму, відношення сигнал/шум та похибку відтворення амплітуди (табл. 13, рис. 11).

Узагальнення отриманих результатів показує, що застосування адаптивного алгоритму забезпечує комплексне покращення характеристик сигналу. Порівняно з базовою фільтрацією, зменшення середньоквадратичного відхилення шуму становить понад 2 рази, тоді як відношення сигнал/шум зростає

більш ніж у два рази. Найбільш суттєвим є зменшення дрейфу базової лінії, що пов'язано з урахуванням температурних і вологісних впливів у моделі обробки.

Таблиця 13 – Кількісні характеристики сигналів після обробки

Параметр	Сирий сигнал $x(t)$	Після LP-фільтра $x_f(t)$	Адаптивний сигнал ($y(t)$)
СКВ шуму, σ	0,032	0,015	0,006
SNR, дБ	8–10	14–16	22–25
Амплітудна похибка, %	12–15	6–8	2–3
Дрейф базової лінії, Ом	0,18	0,12	0,02
Затримка сигналу, мс	0	25–40	10–15

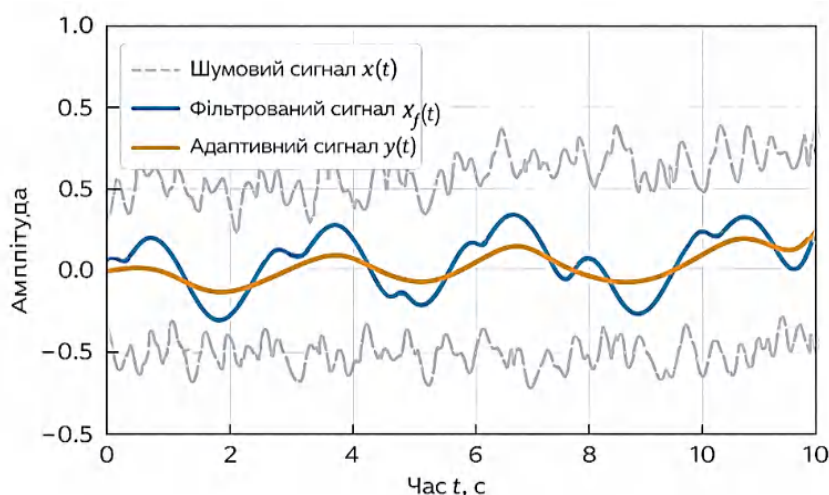


Рисунок 11 – Порівняння сигналів на різних етапах обробки

Отже, результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу та доцільність його використання у системах на основі друкованих текстильних сенсорів.

Розроблений адаптивний алгоритм обробки сигналів друкованого текстильного сенсора може бути використаний у системах, де вимірювання здійснюється в умовах змінних механічних та середовищних впливів.

У сценаріях, пов'язаних із вимірюванням деформацій, застосування алгоритму дозволяє відокремити корисну складову сигналу від паразитних впливів та забезпечити стабільність базової лінії. Це підвищує точність визначення амплітуди та частоти сигналу. У системах тривалого моніторингу алгоритм забезпечує зменшення накопичення похибок за рахунок адаптивної компенсації повільних змін параметрів середовища. Це дозволяє отримувати достовірні результати без необхідності частого калібрування. У динамічних умовах експлуатації запропонований підхід забезпечує зменшення шумових складових без спотворення форми сигналу, що є важливим для аналізу швидкозмінних процесів.

Інтеграція алгоритму у інформаційно-вимірювальні системи дозволяє виконувати попередню обробку сигналу безпосередньо на рівні сенсорного модуля, що підвищує ефективність передачі та подальшого аналізу даних.

Висновки

У результаті дослідження розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, пов'язану з підвищенням якості обробки сигналів друкованих текстильних сенсорів у складі інформаційно-вимірювальних систем. Проведено аналіз сучасного стану розвитку Smart Textile систем, що дозволило визначити основні проблеми їх застосування, зокрема нестабільність сигналів, значний вплив зовнішніх факторів та обмеження класичних методів обробки. Встановлено, що традиційні підходи не забезпечують достатньої точності вимірювання в умовах змінного середовища та механічних деформацій. На основі аналізу технологій друкованої електроніки досліджено особливості формування сенсорних структур у текстильних матеріалах. Показано, що геометричні параметри друкованого провідного елемента, властивості матеріалів та умови експлуатації суттєво впливають на характеристики сигналу сенсора.

У роботі розроблено математичну модель сигналу друкованого текстильного сенсора, яка враховує вплив деформації, температури, вологості та шумових складових. Запропонована модель дозволяє адекватно описувати процес формування сигналу в реальних умовах експлуатації. Ключовим результатом дослідження є розроблення адаптивного алгоритму обробки сигналів, який враховує як параметри друкованого сенсорного елемента, так і вплив зовнішнього середовища. Це забезпечує можливість компенсації шуму та дрейфу сигналу у процесі його обробки.

На основі імітаційного моделювання виконано оцінку ефективності запропонованого підходу. Отримані результати показали суттєве зменшення рівня шуму, зниження похибки вимірювання та стабілізацію базової лінії сигналу. Порівняльний аналіз підтвердив переваги адаптивної обробки над традиційною фільтрацією.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розробленого алгоритму у системах моніторингу, що працюють в умовах змінних механічних та середовищних впливів. Запропонований підхід може бути інтегрований у інформаційно-вимірювальні системи різного призначення, підвищуючи точність та надійність отриманих даних.

Отже, поставлену мету дослідження досягнуто, а отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень у напрямі розвитку інтелектуальних друкованих сенсорних систем.

Список літератури.

1. Komolafe, A., Zaghari, B., Torah, R. et al. (2021). E-Textile Technology Review – From Materials to Application. *IEEE Access*, 9, 97152-97179. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3094303>.
2. Meena, J.S., Choi, S.B., Jung, S.-B., & Kim, J.-W. (2023). Electronic textiles: New age of wearable technology for healthcare and fitness solutions. *Materials Today Bio*, 19, 100565. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2023.100565>.
3. Chen, J., He, T., Du, Z., & Lee, C. (2023). Review of Textile-based Wearable Electronics: From the Structure of the Multi-level Hierarchy Textiles. *Nano Energy*, 108898. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108898>.

4. Simegnaw, A.A., Malengier, B., Rotich, G., Tadesse, M.G., & Van Langenhove, L. (2021). Review on the Integration of Microelectronics for E-Textile. *Materials*, 14(17), 5113. <https://doi.org/10.3390/ma14175113>.
5. Beeby, S.P., Torah, R.N., Wagih, M., Isaia, B., Black, S., Saunders, J., & Yang, K. (2024). Heterogeneous E-Textiles: Materials, Manufacturing and Sustainability. *Advanced Materials Technologies*. <https://doi.org/10.1002/admt.202400844>.
6. Islam, M.R., Afroj, S., Yin, J., Novoselov, K.S., Chen, J., & Karim, N. (2023). Advances in Printed Electronic Textiles. *Advanced Science*. <https://doi.org/10.1002/advs.202304140>.
7. Abtew, M.A., Ahmmed, A.S., Tadesse, M.G., & Zaman, S.U. (2025). Sensor-embedded and electronics textiles: A review on advanced materials, manufacturing, and applications. *Textile Research Journal*. <https://doi.org/10.1177/00405175251338152>.
8. Smith, A.A., Li, R., Xu, L., & Tse, Z.T.H. (2024). A Narrative Review of In-Textile Sensors in Human Health Applications. *Advanced Materials Technologies*. <https://doi.org/10.1002/admt.202302141>.
9. Huang, F.-C., Sun, X.-D., Shi, Y., & Pan, L.-J. (2024). Textile electronics for ubiquitous health monitoring. *Soft Science*, 4(4). <https://doi.org/10.20517/ss.2024.37>.
10. Liu, H., Shi, Y., Pan, Y., Wang, Z., & Wang, B. (2025). Sensory interactive fibers and textiles. *npj Flexible Electronics*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41528-025-00398-4>.
11. Wei, X., Liang, X., Meng, C., Cao, S., Shi, Q., & Wu, J. (2023). Multimodal electronic textiles for intelligent human-machine interfaces. *Soft Science*, 3(2), 17. <https://doi.org/10.20517/ss.2023.09>.
12. Shi, H.H., Pan, Y., Xu, L., Feng, X., Wang, W., Potluri, P., Hu, L., Hasan, T., & Huang, Y.Y.S. (2023). Sustainable electronic textiles towards scalable commercialization. *Nature Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41563-023-01615-z>.

РОЗПОДІЛЕНА МІКРОСЕРВІСНО-ОРІЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ ОБРОБКИ АСТРОНОМІЧНИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕЦИФІКАЦІЇ OPENAPI

Хламов С.В.

к.т.н., доцент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

Орлов С.В.

аспірант, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0008-0680-206X

Табакова І.С.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-6629-4927

***Анотація.** Розділ присвячено застосуванню специфікації OpenAPI у розподіленій мікросервісно-орієнтованій системі для обробки астрономічних даних. Метою є автоматизація процесів обробки із використанням методів інтелектуального аналізу даних та KDD. Запропонований підхід підвищує інтероперабельність, масштабованість і зручність супроводу системи. Каркас системи реалізовано на платформі .NET Core мовою C# з інтеграцією Swagger. Рішення може застосовуватись для обробки астрономічних зображень, реалізації концепції Virtual Observatory та інтеграції з CI/CD.*

***Ключові слова:** інформаційна система, клієнт-серверна архітектура, мікросервісно-орієнтована архітектура, масштабованість, Swagger, OpenAPI, rest API, JSON, .net.*

Вступ

Астероїдно-кометна небезпека стає величезною потенційною проблемою у XXI столітті [1], яка може спричинити глобальні руйнування, зіткнення з геостаціонарними штучними супутниками [2], космічним сміттям тощо. Щоб уникнути такої ситуації, людство постійно розробляє та вдосконалює математичні методи [3] та алгоритми для астрономічного наукового напрямку, такого як обробка астрономічних зображень та комп'ютерний зір [4], що включає вирівнювання фону [5], вирівнювання яскравості [6], астрометричне зменшення [7], фотометричне зменшення [8], виявлення рухомих об'єктів у серії кадрів або навіть відкриття об'єктів Сонячної системи (SSO) [9], таких як комети, астероїди [10], малі планети, галактики, зірки тощо.

Усі астрономічні наукові спостереження створюються за допомогою приладів із зарядовим зв'язком (CCD) [11], які використовуються як основне

обладнання в телескопах або будь-якій іншій оптичній системі в обсерваторіях. Такі астрономічні наукові спостереження збираються протягом заданого періоду спостереження досліджуваних малих небесних SSO [12], а також штучних супутників. Після проведення серії спостережень досліджуваних SSO необхідно проаналізувати результати спостережень, які можуть включати визначення періоду та форми обертань таких досліджуваних SSO. Це означає, що існує багато великих астрономічних даних, і для їх обробки потрібно застосовувати різні підходи інформаційних технологій.

Астрономічна наукова інформація також може бути зібрана з різних історичних кластерів, архівів, віртуальних обсерваторій [13], хмар даних, астрономічних астрометричних та фотометричних каталогів [14], різних серверів та інших сховищ.

Мета та задачі дослідження

Спільною метою всіх науково-технологічних алгоритмів та методів є автоматизація якомога більшої кількості процесів без будь-яких людських дій. У загальних випадках це може бути зроблено за допомогою різних астрономічних наукових інформаційних систем. У цих інформаційних системах для пришвидшення та оптимізації обробки астрономічних даних використовуються різні завдання інтелектуального аналізу даних [15] та пошуку знань у базах даних (KDD) [16].

У випадку, якщо астрономічна наукова інформаційна система є дуже складною та складається з різних математичних модулів та бібліотек, вона стає розподіленою інформаційною системою, орієнтованою на мікросервіси, для обробки астрономічних даних.

Мікросервіси, також відомі як мікросервісна архітектура, – це архітектурний стиль, який структурує застосунок як набір слабо пов'язаних сервісів, кожен з яких реалізує бізнес-можливості. Мікросервісна архітектура забезпечує безперервну доставку та розгортання великих, складних інформаційних систем. Вона також дозволяє організації розвивати свій технологічний стек, масштабувати та бути більш стійкою з часом. Мікросервісна архітектура виступає за перетворення єдиної інформаційної системи на набір слабо пов'язаних сервісів. Ці блоки також забезпечують безперервну доставку та розгортання великих, монолітних інформаційних систем з мінімальною потребою в централізації.

Зі зростанням популярності мікросервісної архітектури [17] зростає складність управління кількома взаємопов'язаними сервісами. Документація стає важливою не лише для зовнішніх користувачів, але й для внутрішніх розробників, яким потрібно розуміти API, що надаються кожним сервісом. Саме тут і вступає в гру Swagger. Swagger, тепер відомий як специфікація OpenAPI, – це потужний інструмент для опису, створення, використання та візуалізації RESTful веб-сервісів.

Swagger спрощує розробку та підтримку API, надаючи інтерфейс, незалежний від мови, для REST API [18]. За допомогою Swagger ви можете створювати клієнтські бібліотеки, серверні заглушки та документацію API, що сприяє чіткій комунікації між вашою командою розробників та за її межами. Це гарантує, що всі мікросервіси розмовляють однією «мовою», коли йдеться про кінцеві точки API, параметри та моделі даних.

Цей розділ спрямований на аналіз основних напрямків та особливостей специфікації OpenAPI для розробки інформаційних систем, орієнтованих на мікросервіси. Реальні приклади астрономічної системи обробки даних реалізовані за допомогою фреймворку .Net Core та мови програмування C#, яка ідеально підходить для розробки розподіленої інформаційної системи, орієнтованої на мікросервіси.

У розділі 2 представлено кілька технологій, пов'язаних з нашою роботою для вирішення завдання документування API. У розділі 3 детально описано архітектуру системи на основі стилю архітектури мікросервісів, представлено інтеграцію специфікації Swagger OpenAPI в реальну реалізацію мікросервісів. У цьому розділі також представлені інтегровані моделі даних для астрономічної системи обробки даних, а також проілюстровано результат виконання. Цей розділ також спрямований на обговорення переваг запропонованого використання специфікації OpenAPI в розподіленій мікросервісно-орієнтованій інформаційній системі для обробки астрономічних даних.

У розділі 4 представлено дискусійну панель з перевагами та недоліками, методами та недоліками запропонованих компонентів розподіленої мікросервісно-орієнтованої інформаційної системи для обробки астрономічних даних та їх аналогів.

Дослідження завершується висновком, який ілюструє основні досягнення досліджень та напрямки майбутньої роботи, а також можливості для додаткових досліджень та вдосконалень.

Огляд літератури

Кожен SSO в цифровому кадрі має типову форму свого зображення [19]. Для виявлення/розпізнавання таких зображень SSO та оцінки їх позиційних та рухових параметрів [22] розроблені загальні методи обробки зображень [20] та машинного зору [21]. Такі методи базуються на аналізі лише тих пікселів, які потенційно належать досліджуваному об'єкту. Недоліками таких методів є дуже низька точність, коли типова форма об'єкта має іншу форму [23].

Методи оцінки апертурної яскравості [24] зображень об'єктів працюватимуть лише з одним зображенням кожного SSO. Будь-які методи узгодженої фільтрації [25, 26] та високочастотної фільтрації [27], які присвячені покращенню якості пошкоджених зображень, є дуже ресурсоемними. Недоліками цих методів є велика складність та низька точність під час обробки астрономічних даних, коли зображення об'єкта має кілька піків величини.

Методи вейвлет-аналізу [28] або навіть аналізу часових рядів [29] не такі ефективні, оскільки ми не маємо великого обсягу вхідних даних для аналізу.

Також недоліком таких алгоритмів є спотворення загальної статистики та можливість обробляти лише чіткі вимірювання без будь-яких відхилень у типовій формі зображення.

Будь-які методи глибокого навчання та розпізнавання образів [30, 31] також вимагають великої кількості астрономічних даних для навчання. Проблема таких методів полягає в тому, що астрономічне зображення має багато артефактів, тому в серії кадрів виявляється багато хибних об'єктів.

У цьому випадку для роботи з ресурсоемними математичними алгоритмами, методами та модулями, які їх реалізують, потрібна розподілена архітектура інформаційної системи, орієнтована на мікросервіси, для обробки астрономічних даних. І специфікації OpenAPI є хорошим підходом для таких цілей.

Існує кілька альтернатив Swagger для реалізації специфікацій OpenAPI, кожна з яких пропонує унікальні функції та переваги, які можуть бути більш підходящими залежно від ваших конкретних вимог. Ось деякі помітні альтернативи, згадані нижче.

Postman – це універсальний інструмент для розробки та тестування API [32]. Postman забезпечує автоматизоване тестування, командну співпрацю та інтеграцію з різними інструментами CI/CD. Він також включає такі функції, як макетні сервери та інтерактивна документація API, що робить його комплексним рішенням для управління життєвим циклом API. Автор описує архітектуру мікросервісів як масштабований метод проектування та впровадження онлайн-додатків. Через свою мережеву природу, мікросервісні додатки потребують тестування в мережевому середовищі.

Автоматизація цих тестів передбачає генерування штучного мережевого трафіку, зазвичай у формі HTTP-запитів до API, таких як REST API. Ці теми досліджуються з точки зору проектування та впровадження тестів, а також ключових особливостей архітектури мікросервісів та автоматизованого тестування загалом. В основі цієї дисертації детально описано процес проектування та впровадження системи автоматизації тестування для Intel Insight, а також платформи автоматичного зберігання зображень та обробки фотограмметрії, побудованої як система мікросервісів.

Платформа Stoplight перевершує інші галузі в галузі проектування, документування та управління API [33]. Вона має зручний інтерфейс для створення специфікацій API за допомогою OpenAPI або RAML, а також включає такі можливості, як інтерактивна документація, генерація коду та інструменти управління API. Примітно, що Stoplight виділяється своїми сильними сторонами у візуальному проектуванні API та інтеграції з інструментами розробки, такими як GitHub та Jira. У згаданій статті автор розглядає проблему, що виникає під час створення та підтримки стандартів OpenAPI для тестування REST API.

Спеціальний інструмент під назвою Respector був представлений як перший метод використання статичного та символічного аналізу програм для генерації специфікацій для REST API з їхнього вихідного коду [34]. Надані експерименти показали, що Respector успішно виявив численні відсутні методи

кінцевих точок, параметри, обмеження та відповіді, а також виявив кілька розбіжностей між специфікаціями, наданими розробниками, та фактичними реалізаціями API. Більше того, Respector перевершив інші методи, які виводять специфікації з анотацій API або шляхом виклику API.

Зі зростанням популярності об'єктно-орієнтованих мов та портативності Java API, розробка та використання програмних компонентів, що можна повторно використовувати, стають все більш можливими [35]. Ефективність повторного використання компонентів значною мірою залежить від надійності цих компонентів, що досягається шляхом комплексного тестування.

Однак у літературі бракує практичних підходів для генерації вхідних даних та перевірки вихідних даних для численних необхідних тестових випадків. Автор представляє інструмент "Roast" та пов'язані з ним методи тестування Java API.

Практичність та ефективність цих методів демонструються за допомогою двох складних компонентів, з кількісними результатами, наданими для перевірки різних підходів.

У кожній з цих статей описані різні сильні сторони, будь то співпраця, інтеграція, інтерактивна документація чи управління API. Залежно від конкретних потреб астрономічного проекту щодо обробки астрономічних даних, одна з цих альтернатив може бути кращою, ніж Swagger, для реалізації специфікацій OpenAPI.

Основна частина

Розподілена інформаційна система, орієнтована на мікросервіси, для обробки астрономічних даних

Проектування сервісу HTTP API, пов'язаного з обробкою астрономічних даних, передбачає створення кінцевих точок, які дозволяють клієнтам взаємодіяти та отримувати дані про небесні об'єкти, астрономічні явища та іншу відповідну інформацію.

На діаграмі нижче представлено високорівневу архітектуру розробленої системи. Вона складається з кількох архітектурних компонентів, включаючи клієнтські програми, агрегатори API серверної частини та мікросервіси домену.

Мікросервіси забезпечують кілька каналів зв'язку, включаючи асинхронні та синхронні способи.

Синхронний канал зв'язку реалізовано шляхом надання HTTP API для зчитування моделі даних. Будь-яка модель даних виконується асинхронно через шину повідомлень (у цьому випадку RabbitMQ).

Оскільки отримання даних виконується через HTTP-запит, ми бачимо важливість інструменту OpenAPI та Swagger. Після оновлення даних через брокер повідомлень асинхронним способом, Swagger дозволяє отримати доступ до HTTP REST API синхронним способом, здійснюючи прямий HTTP-виклик до мікросервісу, який отримує доступ до сховища даних та перевіряє збережену в ньому інформацію.

Рисунок 1 ілюструє наведену діаграму як високорівневу архітектуру для системи, пов'язаної з астрономією, з використанням мікросервісів.

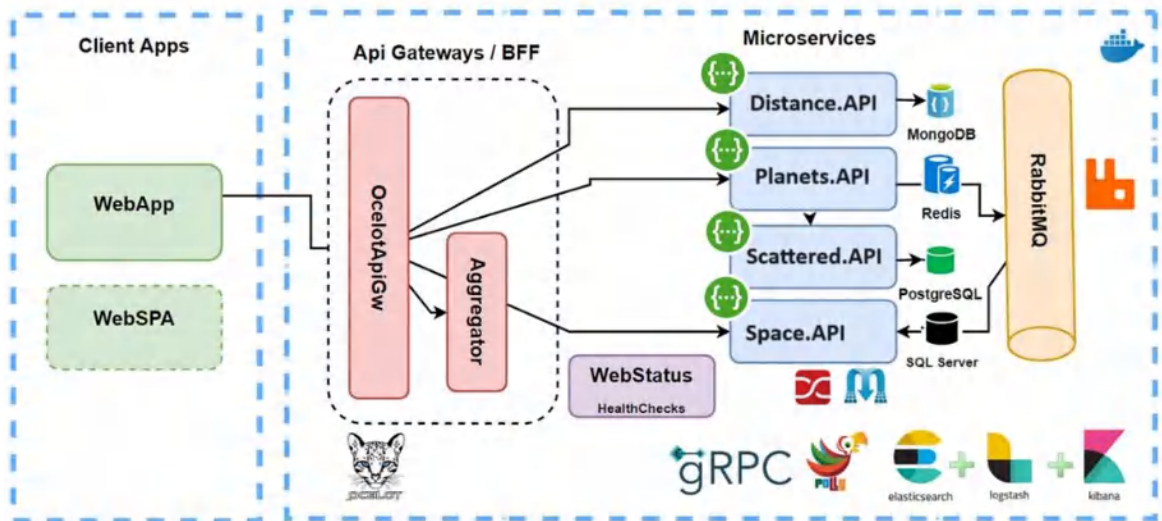


Рисунок 1 – Високорівнева архітектура для системи, пов'язаної з астрономією, з використанням мікросервісів

Ось детальний опис кожного компонента та їхньої взаємодії.

1. Клієнтські програми:

- **WebApp**: традиційний інтерфейс веб-програми, який взаємодіє зі шлюзом API;

- **WebSPA**: односторінковий додаток (SPA), який забезпечує більш динамічний користувацький досвід, а також взаємодіє зі шлюзом API.

2. Шлюзи API / BFF (Backend for Frontend):

- **OcelotApiGw**: це шлюз API, який обробляє запити від клієнтських програм та направляє їх до відповідних мікросервісів. Він надає такі функції, як автентифікація, авторизація, агрегація запитів тощо;

- **Aggregator**: цей компонент агрегує дані з кількох мікросервісів в одну відповідь, оптимізуючи кількість викликів, необхідних клієнтським програмам.

3. Мікросервіси:

- **Distance.API**: обробляє операції, пов'язані з астрономічними відстанями. Він використовує MongoDB для зберігання даних, забезпечуючи гнучке та масштабоване зберігання даних про відстані;

- **Planets.API**: керує даними, пов'язаними з планетами. Він використовує Redis, сховище даних в пам'яті, для підвищення швидкості доступу до даних та кешування;

- **Scattered.API**: ймовірно, має справу з розсіяними об'єктами в космосі, такими як астероїди або комети. Він використовує PostgreSQL, потужну реляційну базу даних з відкритим кодом;

- **Space.API**: керує загальними даними, пов'язаними з космосом. Він спирається на SQL Server, надійну реляційну систему баз даних від Microsoft.

4. RabbitMQ як брокер повідомлень, який використовується для асинхронного зв'язку між мікросервісами. Він забезпечує архітектуру, керовану

подіями, де сервіси можуть публікувати події та підписуватися на них без тісного зв'язку.

5. Додаткові компоненти:

а) **WebStatus (HealthChecks)**: сервіс, який контролює стан справності різних мікросервісів, забезпечуючи їх оптимальну роботу. Він може надати інформацію про час безперебійної роботи та продуктивність сервісів;

б) **gRPC**: високопродуктивний фреймворк RPC з відкритим кодом, який можна використовувати для зв'язку між мікросервісами, пропонуючи такі переваги, як мовна агностицизм, низька затримка та ефективна серіалізація даних;

в) **Polly**: бібліотека стійкості .NET та обробки тимчасових помилок, яка дозволяє розробникам виражати такі політики, як Retry, Circuit Breaker, Timeout, Bulkhead Isolation та Fallback;

г) **ELK Stack (Elasticsearch, Logstash, Kibana)**: набір інструментів для реєстрації, пошуку та візуалізації даних:

– **Elasticsearch**: пошукова та аналітична система;

– **Logstash**: конвеєр обробки даних, який отримує дані з кількох джерел, перетворює їх, а потім надсилає до сховища, такого як Elasticsearch;

– **Kibana**: інструмент візуалізації, що використовується для дослідження даних, що зберігаються в Elasticsearch, що забезпечує графічні представлення та панелі інструментів.

6. Потік даних:

– **Взаємодія з клієнтом**: користувачі взаємодіють з WebApp або WebSPA, який надсилає запити до OcelotApiGw;

– **Маршрутизація шлюзу API**: шлюз API направляє ці запити до відповідного мікросервісу (Distance.API, Planets.API, Scattered.API, Space.API);

– **Агрегація даних**: для складних запитів, що потребують даних з кількох джерел, агрегатор збирає необхідну інформацію;

– **Операції з базою даних**: кожен мікросервіс взаємодіє зі своєю відповідною базою даних (MongoDB, Redis, PostgreSQL, SQL Server) для виконання операцій CRUD;

– **Асинхронний зв'язок**: мікросервіси взаємодіють асинхронно через RabbitMQ, що дозволяє створювати масштабовану та роз'єднану архітектуру;

– **Моніторинг справності**: сервіс WebStatus постійно контролює справність усіх сервісів;

– **Журнал та візуалізація**: журнали та метрики збираються, обробляються та візуалізуються за допомогою стеку ELK, що полегшує моніторинг та налагодження.

Ця архітектура демонструє надійний та масштабований підхід до управління системою, пов'язаною з астрономією, за допомогою мікросервісів, API Gateway, асинхронного зв'язку та комплексних можливостей моніторингу та реєстрації стану. Вона використовує сучасні технології для забезпечення високої продуктивності, стійкості та зручності обслуговування. Як можна зазначити з

наведеної вище діаграми, мікросервіси, представлені HTTP-сервісами API, надають документацію OpenAPI, розкриваючи кінцеві точки Swagger.

Надана специфікація OpenAPI описує API для сервісу, пов'язаного з астрономією, з кількома кінцевими точками для керування та отримання даних про відстані, планети, розсіяні диски, космос та опорні зірки [36]. Нижче наведено детальний опис кожної частини специфікації.

Специфікація надається з використанням OpenAPI версії: 3.0.1. Специфікація реалізована за допомогою інструменту з відкритим кодом під назвою Swagger UI, і нижче наведено приклади використання цього інструменту API.

Перший розділ специфікації (/api/Distance) пов'язаний з вимірюванням астрономічної відстані. Існуючі кінцеві точки HTTP приймають HTTP GET та POST запити до сервісу, що дозволяє вводити запис щодо будь-якої відстані, а також отримувати вже існуючу інформацію.

Специфікацію OpenAPI можна знайти нижче.

GET: Отримує список відстаней.

Теги: Відстань.

Відповіді:

200: Успіх повертає масив об'єктів Distance у форматах text/plain, application/json або text/json.

POST: Створює новий запис відстані.

Теги: Відстань.

Тіло запиту: Приймає об'єкт Distance у форматах application/json, text/json або application/*+json.

Відповіді:

200: Успіх повертає створений об'єкт Distance.

Специфікація Swagger (/api/Planets) пов'язана з планетами у Всесвіті, надаючи кінцеві точки для доступу до всієї інформації, включаючи назви, порядок та планетарну систему. Існуючі контракти дозволяють отримувати існуючий список планет та записувати новий запис про планету, який нещодавно був відкритий.

Специфікацію OpenAPI можна знайти нижче.

GET: Отримує список планет.

Теги: Планети.

Відповіді:

200: Успіх повертає масив рядків, що представляють назви планет у форматах text/plain, application/json або text/json.

POST: Створює новий запис про планету.

Теги: Планети.

Тіло запиту: Приймає рядок у форматах application/json, text/json або application/*+json.

Відповіді:

200: Успіх.

Розсіяний диск – це віддалена область Сонячної системи, яка простягається за орбіту Нептуна. Вона населена групою малих крижаних тіл, відомих як об'єкти розсіяного диска (SDO). Ці об'єкти мають високоеліптичні орбіти, які віддаляють їх від Сонця в їхньому афелії (точці їхньої орбіти, найдалшій від Сонця) та ближче до Сонця в їхньому перигелії (точці їхньої орбіти, найближчій до Сонця). Ключові характеристики розсіяного диска включають орбітальні характеристики, походження, склад, відомі об'єкти.

Перелічені характеристики охоплені специфікацією OpenAPI (/api/ScatteredDisk), наведеною нижче.

GET: Отримує список об'єктів, пов'язаних з простором.

Теги: Пробіл.

Відповіді:

200: Успіх повертає масив рядків у форматах text/plain, application/json або text/json.

POST: Створює новий запис простору.

Теги: Пробіл.

Тіло запиту: Приймає рядок у форматах application/json, text/json або application/*+json.

Відповіді:

200: Успіх

Рисунок 2 ілюструє ефективність використання Swagger у контексті обробки астрономічних даних.

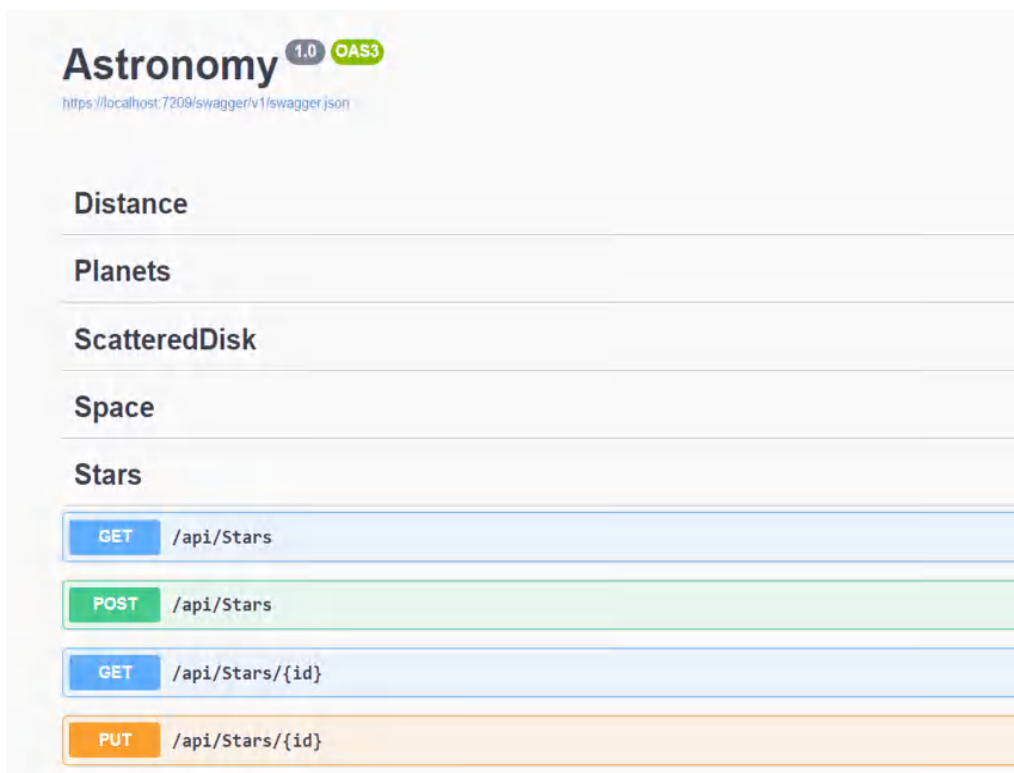


Рисунок 2 – Приклад перетворення специфікації OpenAPI JSON у зручний графічний інтерфейс користувача за допомогою інструменту Swagger

На зображенні нижче ми бачимо приклад перетворення специфікації OpenAPI JSON у зручний графічний інтерфейс користувача за допомогою інструменту Swagger.

Моделі даних визначають структуру ваших сутностей даних у C#. Для астрономічного API ці моделі представляють небесні об'єкти та їхні атрибути. Метою наступного архітектурного компонента є визначення моделі домену та основних атрибутів, необхідних під час обробки астрономічних даних. Наступні важливі атрибути повинні бути визначені всередині астрономічної моделі домену SSO [37]: маса, радіус, ідентифікатор (ім'я) тощо.

Екземпляри цих моделей використовуються у програмі для представлення та маніпулювання даними, пов'язаними із зірками. Візуальне представлення моделей баз даних підкреслює різні структури та технології, що використовуються для кожного мікросервісу. Наступна діаграма демонструє ці моделі (рис. 3).

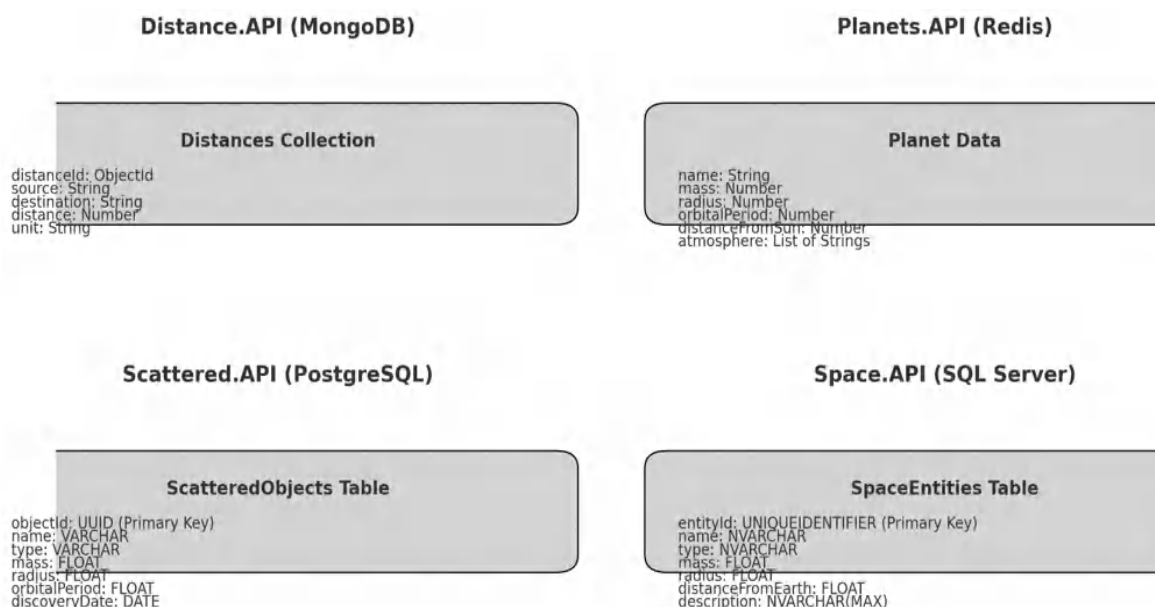


Рисунок 3 – Моделі даних для системи, пов'язаної з астрономією, з використанням мікросервісів

Distance.API (MongoDB). Колекція документів з різними полями для даних про відстані. Ця колекція зберігатиме інформацію про відстані між різними астрономічними об'єктами.

Кожен документ представлятиме певне вимірювання відстані, включаючи джерело та місце призначення вимірювання, значення відстані та одиницю вимірювання.

Модель відстані JSON представлена NoSQL (документно-орієнтованою) базою даних. Колекція бази даних називається Distances і включає наступний набір полів.

```
{
  "distanceId": "60c72b2f4f1a4e3d5c8b4567",
  "source": "Earth",
```

```
"destination": "Mars",
"distance": 0.52,
"unit": "AU"
}
```

Planets.API (Redis). Структури даних в оперативній пам'яті для зберігання даних про планети. У Redis кожна планета зберігатиметься як хеш, де ключ – це унікальний ідентифікатор планети (наприклад, planet:1), а значення – це хеш, що містить різні атрибути планети, такі як назва, маса, радіус, орбітальний період, відстань від сонця та склад атмосфери.

Redis тут використовується для швидких операцій читання та запису, що корисно для часто використовуваних даних.

Модель JSON для планет представлена базою даних NoSQL (сховище ключ-значення). Оскільки це сховище ключ-значення, дані слід зберігати в одному рядку шляхом хешування або серіалізації в рядок JSON.

```
{
  "name": "Earth",
  "mass": 5.972e24,
  "radius": 6371,
  "orbitalPeriod": 365.25,
  "distanceFromSun": 1.00,
  "atmosphere": ["Nitrogen", "Oxygen", "Argon", "Carbon Dioxide"]
}
```

Scattered.API (PostgreSQL). Реляційна таблиця з полями для даних розсіяних об'єктів. Ця таблиця зберігатиме дані про розсіяні астрономічні об'єкти, такі як астероїди та комети.

Кожен рядок представляє об'єкт з атрибутами, включаючи його ідентифікатор, назву, тип, масу, радіус, орбітальний період та дату відкриття. PostgreSQL обрано за його відповідність ACID та потужні можливості запитів.

Розсіяні об'єкти зберігаються в реляційній базі даних SQL з унікальним ідентифікатором як первинним ключем для кожного розсіяного об'єкта та списком пов'язаних атрибутів.

```
CREATE TABLE ScatteredObjects (
  objectId UUID PRIMARY KEY,
  name VARCHAR(255),
  type VARCHAR(50),
  mass FLOAT,
  radius FLOAT,
  orbitalPeriod FLOAT,
  discoveryDate DATE
);
```

Space.API (SQL Server). Реляційна таблиця для даних космічних об'єктів з вичерпними полями для детальної інформації.

Ця таблиця зберігатиме загальну інформацію про різні космічні об'єкти, такі як зірки, галактики та туманності.

Кожен рядок представляє об'єкт з атрибутами, включаючи його ідентифікатор, назву, тип, масу, радіус, відстань від Землі та опис.

SQL Server використовується тут завдяки своїм корпоративним функціям та надійній продуктивності.

Модель Space SQL також представлена як реляційна таблиця бази даних з відповідним основним атрибутом та списком призначених атрибутів.

```
CREATE TABLE SpaceEntities (  
  entityId UNIQUEIDENTIFIER PRIMARY KEY,  
  name NVARCHAR(255),  
  type NVARCHAR(50),  
  mass FLOAT,  
  radius FLOAT,  
  distanceFromEarth FLOAT,  
  description NVARCHAR(MAX)  
);
```

Ця архітектура використовує сильні сторони кожної технології баз даних, забезпечуючи оптимальну продуктивність, масштабованість та гнучкість для обробки різноманітних вимог до даних в HTTP-сервісі, пов'язаному з астрономією.

Каркас запропонованої специфікації OpenAPI в розподіленій інформаційній системі, орієнтованій на мікросервіси, для обробки астрономічних даних був протестований в рамках програмного забезпечення Lemur проекту Collection Light Technology (CoLiTec) (<https://colitec.space>) [38].

Конкретні модулі та сервіси, пов'язані з математичними методами та алгоритмами в програмному забезпеченні Lemur:

- автоматичне калібрування кадру;
- косметична корекція кадру;
- функція відстеження та стекування;
- вирівнювання яскравості;
- вирівнювання фону [6];
- фільтрація астрономічних зображень [5, 27];
- визначення контурів об'єктів;
- розпізнавання зображень [30, 31];
- формування типової форми [19];
- виявлення рухомих об'єктів (з майже нульовим, нормальним, швидким видимим рухом) [39];
- повністю автоматизований робустильний метод астрометричної редукції [7];

– повністю автоматизований робусти́й метод фотометричного відновлення [40];

– підтримка багатопотокової обробки;

– передача астрономічних даних з проміжним зберіганням.

Більш детальна інформація про програмне забезпечення Lemur проекту CoLiTeс представлена в цих статтях [41, 42, 43] та дослідженнях [44, 45].

Приклад даних JSON, реалізованих в рамках розподіленої мікросервісно-орієнтованої інформаційної системи для обробки астрономічних даних для програмного забезпечення Lemur, є відповіддю на API, що надає інформацію про відстань між небесними тілами, згаданими нижче.

```
{
  "origin": {
    "name": "Earth",
    "type": "Planet",
    "coordinates": {
      "x": 0.0,
      "y": 0.0,
      "z": 0.0
    }
  },
  "destination": {
    "name": "Mars",
    "type": "Planet",
    "coordinates": {
      "x": 1.5,
      "y": 0.5,
      "z": 0.2
    }
  },
  "distance": {
    "unit": "AU",
    "value": 1.52
  },
  "travelTime": {
    "unit": "days",
    "value": 300
  },
  "path": [
    {
      "x": 0.5,
      "y": 0.2,
      "z": 0.1
    }
  ],
}
```

```

    {
      "x": 1.0,
      "y": 0.4,
      "z": 0.15
    },
    {
      "x": 1.5,
      "y": 0.5,
      "z": 0.2
    }
  ],
  "metadata": {
    "requestTime": "2026-05-18T12:34:56Z",
    "responseTime": "2026-05-18T12:34:57Z",
    "service": "DistanceAPI"
  }
}

```

Представлена структура JSON містить таку цінну інформацію:

- **origin**. Інформація про початкову точку розрахунку відстані, включаючи назву, тип (наприклад, планета, зірка) та координати у 3D-просторі;
- **destination**. Інформація про кінцеву точку розрахунку відстані, подібну до точки початку координат;
- **distance**. Розрахована відстань між точкою початку координат та точкою призначення, а також одиниця вимірювання (наприклад, астрономічні одиниці - AU);
- **travelTime**. Орієнтовний час подорожі для подолання відстані, а також одиниця вимірювання (наприклад, дні);
- **path**. Масив координат, що представляє шлях від точки початку до точки призначення;
- **metadata**. Додаткова інформація про запит API, включаючи час запиту та відповіді, а також назву сервісу, який надав дані.

Ця структура JSON розроблена як комплексна та може бути розширена на основі конкретних вимог та додаткових атрибутів, які можуть бути релевантними для API відстані в архітектурі мікросервісів.

Результати досліджень

Обговорення

Впровадження Swagger в архітектуру мікросервісів надає численні переваги, значно покращуючи як фази розробки, так і фази підтримки сервісно-орієнтованих програм. Swagger, як фреймворк з відкритим кодом, спрощує проектування, створення, документування та використання RESTful веб-сервісів.

Його здатність генерувати інтерактивну документацію API з анотацій коду гарантує, що всі зацікавлені сторони мають доступ до актуальної та точної інформації про API, сприяючи кращій комунікації та співпраці в командах розробників.

Однією з основних переваг використання Swagger є стандартизована документація, яку він надає. Ця стандартизація гарантує, що кожен мікросервіс дотримується узгодженого формату, спрощуючи розуміння та використання API в різних сервісах. Ця узгодженість є критично важливою в архітектурі мікросервісів, де кілька сервісів повинні безперешкодно взаємодіяти, а розробникам може знадобитися одночасно працювати з різними API.

Інтерактивна документація Swagger також дозволяє розробникам тестувати API безпосередньо з інтерфейсу документації. Ця функція спрощує процес розробки та налагодження, дозволяючи швидше виконувати ітерації та ефективніше виправляти несправності. Забезпечуючи чіткий та інтерактивний спосіб візуалізації та тестування кінцевих точок API, Swagger скорочує криву навчання для нових розробників та підвищує продуктивність.

Крім того, Swagger підтримує автоматичну генерацію коду для клієнтів API різними мовами програмування, що прискорює розробку клієнтських програм та сервісів. Ця автоматизація мінімізує помилки ручного кодування та гарантує, що клієнтські реалізації відповідають специфікаціям API, що ще більше сприяє узгодженості та надійності в усій системі.

В екосистемі мікросервісів, де сервіси часто розробляються, розгортаються та масштабуються незалежно, підтримка актуальної документації може бути складною. Swagger вирішує цю проблему, інтегруючись безпосередньо з кодовою базою, гарантуючи, що будь-які зміни в API автоматично відображаються в документації. Ця інтеграція особливо корисна для конвеєрів безперервної інтеграції та безперервного розгортання (CI/CD), гарантуючи, що зміни API документуються та тестуються протягом усього життєвого циклу розробки.

Використання Swagger також покращує видимість та зручність використання API. Завдяки добре документованому API внутрішні та зовнішні розробники можуть легко досліджувати доступні кінцеві точки, розуміти вимоги до вхідних та вихідних даних, а також ефективніше інтегрувати сервіси. Ця можливість виявлення є вирішальною для сприяння інноваціям та надання розробникам можливості використовувати існуючі сервіси для створення нових функцій.

Крім того, підтримка Swagger версій API гарантує, що зміни та оновлення API можна керувати без порушення роботи існуючих споживачів. Ця можливість є важливою в архітектурі мікросервісів, де різні сервіси та клієнти можуть залежати від різних версій одного й того ж API. Чітко документуючи кінцеві точки з версіями, Swagger допомагає підтримувати зворотну сумісність та плавні переходи під час оновлень.

Загалом, використання Swagger в архітектурі мікросервісів оптимізує робочі процеси розробки, покращує якість API та покращує співпрацю між

командами. Його вичерпна документація, інтерактивні функції та можливості автоматизації роблять його незамінним інструментом для управління складними екосистемами сервісів.

Забезпечуючи належну документацію, легкість тестування та послідовне впровадження API, Swagger сприяє надійності, масштабованості та зручності обслуговування програм на основі мікросервісів. На завершення, інтеграція Swagger в архітектуру мікросервісів є стратегічним рішенням, яке може значно покращити як досвід розробки, так і операційну ефективність сервісно-орієнтованих систем.

Надане JSON-представлення системи обробки астрономічних даних демонструє ефективний та структурований підхід до надання важливих астрономічних даних в рамках архітектури мікросервісів. Інкапсулюючи деталі джерела та призначення, включаючи їхні координати та типи, API пропонує точну та вичерпну інформацію про небесні тіла.

Включення вимірювань відстані в астрономічних одиницях (AU) гарантує, що дані є науково релевантними та придатними для використання в різних астрономічних розрахунках та аналізах. Крім того, розрахунковий час подорожі між небесними тілами, виражений у днях, надає цінну інформацію для планування гіпотетичних космічних місій або розуміння відносних відстаней у космосі.

Масив шляхів, який детально описує координати від джерела до місця призначення, додає ще один рівень корисності, потенційно допомагаючи у візуалізації подорожі космосом. Ця функція особливо корисна для освітніх інструментів, симуляцій та візуальних представлень у програмах, які потребують детальної траєкторії космічних подорожей.

Метадані, що охоплюють час запитів та відповідей, а також ідентифікацію сервісу, підвищують прозорість та відстежуваність API. Такі метадані мають вирішальне значення для моніторингу та налагодження в розподіленій системі, гарантуючи, що сервіс залишається надійним та зручним у обслуговуванні.

У контексті архітектури мікросервісів ця структура JSON ілюструє, як сервіси можуть бути модульними та незалежно масштабованими, що сприяє кращому використанню ресурсів та спрощенню управління. Використання чітко визначених кінцевих точок та чітких контрактів даних робить Distance API надійним компонентом, який може безперешкодно інтегруватися з іншими мікросервісами, такими як ті, що працюють з планетарною інформацією або об'єктами розсіяного диска.

Цей модульний підхід не тільки підвищує стійкість системи, але й дозволяє незалежні оновлення та масштабування окремих сервісів, покращуючи загальну продуктивність системи та зручність обслуговування.

Більше того, розширюваність структури JSON гарантує, що API може розвиватися разом зі зростаючими потребами своїх користувачів, враховуючи нові точки даних та функції, не порушуючи існуючу функціональність. Ця передбачливість у дизайні підтримує довгострокову стійкість та адаптивність сервісу. Детальна інформація, що надається Distance API, може служити різним

зацікавленим сторонам, від дослідників та викладачів до ентузіастів космосу та розробників, що робить його універсальним інструментом у галузі астрономії.

Структурована модель даних допомагає у створенні зручних інтерфейсів та інтуїтивно зрозумілих візуалізацій, сприяючи більшій залученості та розумінню серед користувачів. Дотримуючись найкращих практик у розробці API, таких як чіткі правила іменування та узгоджені формати даних, Distance API встановлює стандарт для інших сервісів в архітектурі мікросервісів. Така узгодженість забезпечує цілісний користувацький досвід та спрощує процес розробки нових функцій та сервісів.

Висновки

Ми представили використання специфікації OpenAPI в розподіленій мікросервісно-орієнтованій інформаційній системі для обробки астрономічних даних. Спільною метою всіх науково-технологічних алгоритмів і методів є автоматизація максимальної кількості доступних процесів без будь-яких дій людини.

У загальних випадках це може бути виконано за допомогою різних розподілених мікросервісно-орієнтованих інформаційних систем для обробки астрономічних даних. У цих конвеєрах різні завдання інтелектуального аналізу даних та пошуку знань у базах даних використовуються для пришвидшення та оптимізації обробки астрономічних даних.

Запропоноване використання специфікації OpenAPI в розподіленій мікросервісно-орієнтованій інформаційній системі для обробки астрономічних даних значно покращує сумісність, масштабованість та зручність обслуговування системи.

Розроблений скелет реального прикладу астрономічної системи обробки даних реалізовано за допомогою фреймворку .Net Core та мови програмування C#. Реалізація Swagger в мікросервісній архітектурі має численні переваги, значно покращуючи як фази розробки, так і фази підтримки сервісно-орієнтованих застосунків.

Розроблений скелет та запропонований підхід будуть корисними для різних мікросервісно-орієнтованих інформаційних систем для обробки астрономічних даних.

Його можна використовувати для всіх видів обробки астрономічних зображень, використовуючи різні математичні методи та алгоритми, реалізовані як інструмент, модуль або сервіс. Ще одним гарним прикладом застосування запропонованого скелета є реалізація концепції віртуальної обсерваторії (ВО).

Сучасні міжнародні астрономічні, астрометричні та фотометричні каталоги зараз доступні в хмарі, тому будь-яка взаємодія з такими даними з них вимагає інтеграції сервісів для обробки. Мікросервісно-орієнтована архітектура також буде дуже корисною в складних інформаційних системах для обробки

астрономічних даних з інтеграцією принципів безперервної інтеграції/безперервної доставки (CI/CD).

Подальші дослідження будуть проведені щодо тестування [46] та інтеграції запропонованої специфікації OpenAPI в розподілену мікросервісно-орієнтовану інформаційну систему для обробки астрономічних даних в рамках програмного забезпечення Lemur проекту Collection Light Technology (CoLiTec) [47].

Список літератури.

1. Wheeler, L., et al. (2024). Risk assessment for asteroid impact threat scenarios. *Acta Astronautica*, 216, 468-487. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.12.049>.
2. Akhmetov, V., et al. (2019). Cloud computing analysis of Indian ASAT test on March 27, 2019. *IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology*. (p. 315-318). <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061243>.
3. Savanevych, V., et al. (2023). Mathematical methods for an accurate navigation of the robotic telescopes. *Mathematics*, 11(10), 2246. <https://doi.org/10.3390/math11102246>.
4. Klette, R. (2014). *Concise computer vision: An introduction into theory and algorithms*. Springer.
5. Vlasenko, V., et al. (2024). Devising a procedure for the brightness alignment of astronomical frames background by a high frequency filtration to improve accuracy of the brightness estimation of objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2-128), 31-38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301327>.
6. Parimucha, Š., et al. (2019). CoLiTecVS – A new tool for an automated reduction of photometric observations. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 49(2), 151-153.
7. Akhmetov, V., et al. (2020). Astrometric reduction of the wide-field images. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1080. (p. 896-909). https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_58.
8. Kudak, V., Epishev, V., Perig, V., & Neybauer, I. (2017). Determining the orientation and spin period of TOPEX/Poseidon satellite by a photometric method. *Astrophysical Bulletin*, 72(3), 340-348. <https://doi.org/10.1134/S1990341317030233>.
9. Khlamov, S., & Savanevych, V. (2020). Big astronomical datasets and discovery of new celestial bodies in the Solar System in automated mode by the CoLiTec software. *Knowledge discovery in big data from astronomy and earth observation: Astrogeoinformatics*. (p. 331-345). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00030-8>.
10. Troianskyi, V., Godunova, V., Serebryanskiy, A., et al. (2024). Optical observations of the potentially hazardous asteroid (4660) Nereus at opposition 2021. *Icarus*, 420, 116146. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116146>.
11. Adam, G., Kontaxis, P., Doulos, L., Madias, E.-N., Bouroussis, C., & Topalis, F. (2019). Embedded microcontroller with a CCD camera as a digital lighting control system. *Electronics*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/electronics8010033>.
12. Oszkiewicz, D., et al. (2023). Spins and shapes of basaltic asteroids and the missing mantle problem. *Icarus*, 397, 115520. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2023.115520>.
13. Vavilova, I. B., Yatskiv, Y. S., Pakuliak, L. K., et al. (2016). UkrVO astroinformatics software and web-services. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(S325), 361-366. <https://doi.org/10.1017/S1743921317001661>.
14. Akhmetov, V., et al. (2019). Fast coordinate cross-match tool for large astronomical catalogue. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 871. (p. 3-16). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01069-0_1.

15. Borne, K. D. (2008). Scientific data mining in astronomy. Next generation of data mining. (p. 115-138). Chapman & Hall/CRC.
16. Zhang, Y., & Zhao, Y. (2015). Astronomy in the big data era. *Data Science Journal*, 14.
17. Raychev, N. (2020). Test automation in microservice architecture. *IEEE Spectrum*, 8(7).
18. Huang, R., Motwani, M., Martinez, I., & Orso, A. (2024). Generating REST API specifications through static analysis. *Proceedings of the IEEE/ACM 46th International Conference on Software Engineering (ICSE)*. (p. 1-13). <https://doi.org/10.1145/3597503.3639137>.
19. Savanevych, V., et al. (2022). Formation of a typical form of an object image in a series of digital frames. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(2-120), 51-59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266988>.
20. Burger, W., & Burge, M. (2009). *Principles of digital image processing: Fundamental techniques*. Springer.
21. Khlamov, S., Tabakova, I., Trunova, T., & Deineko, Z. (2022). Machine vision for astronomical images using the Canny edge detector. *CEUR Workshop Proceedings*, 3384, 1-10.
22. Troianskyi, V., Kankiewicz, P., & Oszkiewicz, D. (2023). Dynamical evolution of basaltic asteroids outside the Vesta family in the inner main belt. *Astronomy & Astrophysics*, 672, A97. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245678>.
23. Oszkiewicz, D., et al. (2020). Spin rates of V-type asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 643, A117. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038062>.
24. Savanevych, V., et al. (2022). CoLiTecVS software for the automated reduction of photometric observations in CCD-frames. *Astronomy and Computing*, 40, 100605. <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2022.100605>.
25. Khlamov, S., Savanevych, V., Vlasenko, V., Briukhovetskyi, O., Trunova, T., Levykin, I., Shvedun, V., & Tabakova, I. (2023). Development of the matched filtration of a blurred digital image using its typical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9-121), 62-71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273674>.
26. Khlamov, S., et al. (2022). Development of computational method for matched filtration with analytic profile of the blurred digital image. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4-119), 24-32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265309>.
27. Politsch, C. A., et al. (2020). Trend filtering—I. A modern statistical tool for time-domain astronomy and astronomical spectroscopy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(3), 4005-4018. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa106>.
28. Dadkhah, M., et al. (2019). Methodology of wavelet analysis in research of dynamics of phishing attacks. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 12(3-4), 220-238. <https://doi.org/10.1504/IJAIP.2019.098561>.
29. Kirichenko, L., Alghawli, A. S. A., & Radivilova, T. (2020). Generalized approach to analysis of multifractal properties from short time series. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(5), 183-198. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110527>.
30. Khlamov, S., et al. (2022). The astronomical object recognition and its near-zero motion detection in series of images by in situ modeling. *Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Systems, Signals, and Image Processing (IWSSIP 2022)*. (p. 1-4). <https://doi.org/10.1109/IWSSIP55020.2022.9854475>.
31. Khlamov, S., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Recognition of the astronomical images using the Sobel filter. *29th IEEE International Conference on Systems, Signals, and Image Processing (IWSSIP 2022)* (p. 1-4). <https://doi.org/10.1109/IWSSIP55020.2022.9854425>.
32. da Costa, D.N.N. (2022). *Guidelines for testing microservice-based applications* (Master's dissertation, 80 p.).
33. Stoplight. (n.d.). *Solutions*. Retrieved from <https://stoplight.io/solutions>.
34. Golmohammadi, A., Zhang, M., & Arcuri, A. (2023). Testing RESTful APIs: A survey. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 33(1), 1-41.

35. Hoffman, D., & Strooper, P. (2002). Tools and techniques for Java API testing. Australian Software Engineering Conference. (p. 235-245). <https://doi.org/10.1109/ASWEC.2000.844580>.
36. Khlamov, S., et al. (2024). Automated data mining of the reference stars from astronomical CCD frames. CEUR Workshop Proceedings, 3668, 83-97.
37. Troianskyi, V., Kashuba, V., Bazyey, O., et al. (2023). First reported observation of asteroids 2017 AB8, 2017 QX33, and 2017 RV12. Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, 53, 5-15. <https://doi.org/10.31577/caosp.2023.53.2.5>.
38. Khlamov, S., et al. (2024). Machine vision for astronomical images using the modern image processing algorithms implemented in the CoLiTec software. In Measurements and Instrumentation for Machine Vision. Chap. 12. (p. 269-310). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003343783-12>.
39. Khlamov, S., et al. (2016). Development of computational method for detection of the object's near-zero apparent motion on the series of CCD-frames. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(9(80)), 41-48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65999>.
40. Kudzej, I., et al. (2019). CoLiTecVS – A new tool for the automated reduction of photometric observations. Astronomische Nachrichten, 340(1-3), 68-70. <https://doi.org/10.1002/asna.201913562>.
41. Savanevych, V., et al. (2015). A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 451(3), 3287-3298. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv1124>.
42. Mykhailova, L., et al. (2014). Method of maximum likelihood estimation of compact group objects location on CCD-frame. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(4), 16-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.28028>.
43. Savanevych, V., et al. (2018). A method of immediate detection of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames. Astronomy & Astrophysics, 609, A54. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630323>.
44. Shvedun, V., et al. (2016). Statistical modelling for determination of perspective number of advertising legislation violations. Actual Problems of Economics, 184(10), 389-396.
45. Savanevych, V., et al. (2015). Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 31(6), 302-313.
46. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., Trunova, T., & Teslenko, Y. (2025). Performance percentile analysis for API-based testing. Information control systems and intelligent technologies. Achievements and applications. Section 2 “Intelligent systems and data analysis”. (p. 235-253). Liha-Pres. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-13>.
47. Khlamov, S., et al. (2022). Data mining of the astronomical images by the CoLiTec software. CEUR Workshop Proceedings, 3171, 1043-1055.

КОНВЕЄР ОБРОБКИ ДЛЯ АСТРОНОМІЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРАВИЛ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Хламов С.В.

к.т.н., доцент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

Нетребін Ю.М.

аспірант, кафедра комп'ютерного моделювання та інтелектуальних технологій,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0001-8778-3241

Трунова Т.О.

асистент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0003-2689-2679

***Анотація.** У роботі запропоновано інтелектуальний модуль підтримки прийняття рішень для обробки великих масивів астрономічних даних, інтегрований із системою журналювання PostgreSQL та впроваджений у ПЗ Lemur проекту CoLiTec. Гібридний підхід (правила + ШІ) забезпечує ефективний моніторинг, виявлення аномалій і оптимізацію ресурсів, підвищуючи швидкість ухвалення рішень на 65 % і скорочуючи час відновлення після збоїв на 50 % порівняно з традиційними методами.*

***Ключові слова:** прийняття рішень, аналіз даних, штучний інтелект, великі дані, обробка даних, конвеєр.*

Вступ

Зростаючий обсяг астрономічних великих даних з космічних та наземних обсерваторій [1] вимагає інноваційних автоматизованих методів аналізу даних [2] та прийняття рішень. Це призвело до безпрецедентних проблем у процесах аналізу даних, класифікації та виявлення аномалій.

Традиційні підходи спираються на моніторинг на основі правил, який часто є неефективним, негнучким та схильним до помилок у масштабних операціях. Такі системи моніторингу на основі правил стикаються зі зростаючою складністю та обсягом журналів спостережень, що робить прийняття рішень у режимі реального часу [3] та автоматизоване виявлення аномалій важливими для підтримки цілісності та ефективності даних.

Штучний інтелект (ШІ) [4] став надійною альтернативою, пропонуючи можливість виявляти аномалії, класифікувати події та оптимізувати робочі процеси з мінімальним втручанням людини. В роботі представлено систему прийняття рішень на основі ШІ, призначену для автоматизації аналізу журналів,

виявлення стану обробки та класифікації помилок у конвеєрах астрономічної обробки та аналізу великих даних [5]. Система інтегрується з базою даних PostgreSQL [6], забезпечуючи гнучкий та масштабований механізм реєстрації для виявлення астрономічних знань у базах даних [7].

Мета та задачі дослідження

Ключові цілі дослідження такі:

- підвищення ефективності та точності обробки журналів астрономічних даних;
- автоматизація виявлення аномалій з відмовостійкістю в конвеєрах обробки;
- забезпечення прийняття рішень у режимі реального часу щодо переходів станів обробки.

Швидке збільшення обсягу астрономічних даних з великомасштабних спостережних приладів, таких як обсерваторія Віри К. Рубін, космічний телескоп Джеймса Вебба (JWST) та різні масиви радіотелескопів, призвело до безпрецедентних проблем у видобуванні даних, класифікації та виявленні аномалій. Традиційні системи моніторингу на основі правил стикаються зі зростаючою складністю та обсягом журналів спостережень, що робить прийняття рішень у режимі реального часу та автоматизоване виявлення аномалій необхідними для підтримки цілісності та ефективності даних.

Щоб вирішити ці проблеми, ми представили модуль прийняття рішень на базі штучного інтелекту, призначений для автоматизації аналізу журналів, моніторингу процесів та виявлення аномалій в конвеєрах астрономічних даних.

На відміну від традиційних систем, він поєднує логіку на основі правил, методи машинного навчання та обробку природної мови (NLP) для оптимізації автоматизації робочого процесу та відновлення після збоїв.

Цей розділ робить внесок у сферу прийняття рішень на основі штучного інтелекту в астрономічному аналізі даних шляхом наступного:

- пропонування гібридної структури на основі штучного інтелекту для оцінки журналів у режимі реального часу;
- демонстрація покращень масштабованості за допомогою методів оптимізації бази даних;
- інтеграція автоматичного виявлення збоїв та навчання з підкріпленням для самоадаптивної обробки помилок.

Експериментальні результати показали скорочення часу обробки на 65% та покращення автоматизованого відновлення після збоїв на 50% порівняно з традиційними системами на основі правил.

Розділ організовано таким чином, щоб допомогти читачеві ознайомитися з концептуальною основою, технічною реалізацією та практичними результатами запропонованої системи. Він починається з огляду літератури в розділі 2, який досліджує існуючі підходи до астрономічного аналізу даних, з акцентом на

методах штучного інтелекту для автоматизованого прийняття рішень у великомасштабних наборах даних спостережень.

У розділі 3 окреслено системну архітектуру конвеєра обробки, детально описано інтеграцію обробки журналів та правил прийняття рішень на основі штучного інтелекту, етапи попередньої обробки даних, стратегії управління робочим процесом, моніторинг та взаємодію з користувачами. У розділі 4 наведено реалізацію робочого процесу, включаючи детальну структуру бази даних, основні таблиці, функції бази даних, модель прийняття рішень на основі штучного інтелекту, моніторинг та сповіщення в режимі реального часу.

Результати в розділі 5 наведено приклади варіантів використання, міркування щодо масштабованості та продуктивності, показники продуктивності, включаючи швидкість обробки, відновлення після помилок, відмовостійкість та ефективність використання ресурсів, досягнуті під час експериментальної перевірки. Також цей розділ містить порівняння традиційних та заснованих на штучному інтелекті підходів до астрономічного аналізу даних. Результати інтерпретуються в контексті сучасних астрономічних дослідницьких проблем, підкреслюючи переваги над традиційними методами та виявляючи потенційні обмеження.

Розділ завершується висновком у розділі 6, який ілюструє висновки та основні напрямки майбутньої роботи та дослідження, а також можливості для майбутніх досліджень та вдосконалень.

Огляд літератури

Штучний інтелект революціонував численні галузі, забезпечивши автоматизацію, прогнозне моделювання та інтелектуальне прийняття рішень. Аналіз літератури підкреслює трансформаційний вплив ШІ в різних сферах, включаючи інформаційні технології (ІТ), економіку, робототехніку, охорону здоров'я, фінанси, автономні системи, науку про навколишнє середовище та навіть астрономію.

У секторі ІТ ШІ посилює кібербезпеку, оптимізує управління даними, автоматизує розробку програмного забезпечення та підвищує ефективність хмарних обчислень [8]. ШІ покращує економічне прогнозування, аналіз ринку, оптимізацію ланцюгів поставок та прийняття рішень у розробці політики [9].

У робототехніці ШІ забезпечує автономне керування, прийняття рішень у режимі реального часу, взаємодію людини та робота, а також підвищення ефективності промислової автоматизації [10]. В автономних системах самокеровані автомобілі, робототехніка та дрони використовують ШІ для сприйняття, навігації та прийняття рішень у режимі реального часу. Інтеграція ШІ в охорону здоров'я призвела до значних покращень у діагностиці [11], веденні пацієнтів та відкритті ліків завдяки глибокому машинному навчанню [12], обробці природної мови (NLP) та роботам-асистованих операціях. Методи NLP широко використовуються для аналізу електронних медичних записів, що

дозволяє автоматизовано підсумовувати історію хвороби пацієнтів та прогнозувати аналіз для персоналізованих рекомендацій щодо лікування [13].

В астрономічних дослідженнях ШІ сприяє класифікації небесних об'єктів [14], виявленню аномалій у даних спостережень та прийняттю рішень у режимі реального часу в конвеєрах обробки даних [15]. Моделі машинного навчання допомагають ідентифікувати екзопланети з даних місій Kepler [16] та TESS [17], виділяючи потенційних кандидатів від шуму.

Методи комп'ютерного зору [18] на основі ШІ автоматизують виявлення тимчасових подій, таких як наднові та гамма-спалахи. Крім того, навчання з підкріпленням використовується в плануванні роботи телескопів та автономному дослідженні космосу, оптимізуючи стратегії спостережень.

Фінансові установи використовують ШІ для управління ризиками [19] та оцінки, виявлення шахрайства та алгоритмічної торгівлі. Алгоритми машинного навчання обробляють величезні транзакційні дані для виявлення шахрайської діяльності з високою точністю. Це також покращує алгоритмічну торгівлю та персоналізовані фінансові послуги, значно зменшуючи фінансові злочини. Використання глибокого навчання з підкріпленням в оптимізації портфеля також набуло популярності, пропонуючи адаптивні стратегії, які динамічно адаптуються до ринкових умов.

Штучний інтелект відіграє вирішальну роль у моделюванні клімату, прогнозуванні погоди та управлінні стихійними лихами. Нейронні мережі покращують кліматичні симуляції, удосконалюючи атмосферні моделі та прогножуючи екстремальні погодні явища з більшою точністю [20].

Методи дистанційного зондування на основі ШІ обробляють супутникові знімки [21] для моніторингу вирубки лісів, здоров'я океану та втрати біорізноманіття. Крім того, прогнозна аналітика допомагає в плануванні реагування на стихійні лиха, прогножуючи вплив ураганів, повеней та лісових пожеж, сприяючи своєчасному втручанням.

ШІ трансформує навчання, забезпечуючи персоналізовану освіту [22] за допомогою адаптивних систем навчання, інтелектуальних рекомендацій щодо контенту та автоматизованого оцінювання. Обробка природної мови підтримує інтерактивних чат-ботів та віртуальних помічників, які підвищують залученість учнів [23], тоді як машинне навчання аналізує моделі навчання для оптимізації розробки навчальних програм.

Крім того, інструменти на базі ШІ допомагають викладачам оцінювати прогрес учнів, виявляти прогалини в знаннях та надавати цілеспрямовану підтримку, зрештою покращуючи результати навчання та доступність як у традиційному, так і в онлайн-середовищі освіти [24].

Кілька підходів на основі ШІ було застосовано до астрономічного аналізу даних [25]. Для класифікації об'єктів, виявлення аномалій та виявлення тимчасових подій використовувалися методи машинного зору [26], нейронні мережі на основі нечіткого середовища, аналіз коротких часових рядів [27], вейвлет-аналіз [28], алгоритми кластеризації та дерева рішень. Однак більшість

цих підходів зосереджені на аналізі даних, а не на процесі прийняття рішень для управління журналами та оптимізації робочого процесу. Нещодавні досягнення в астрономічному аналізі даних на основі штучного інтелекту зосереджені на класифікації об'єктів, виявленні тимчасових подій та розпізнаванні аномалій.

Такі системи, як AstroML [29] та TESS Data Processing Pipeline [17], включають методи машинного навчання для класифікації даних, але не мають системи прийняття рішень у реальному часі для оцінки журналів та автоматизованого контролю робочого процесу.

Існуючі системи управління робочим процесом в основному спираються на:

- системи моніторингу на основі правил (наприклад, Apache Airflow [30]), які вимагають ручного визначення правил для фільтрації журналів;
- моделі класифікації на основі штучного інтелекту для ідентифікації небесних об'єктів, але без прямої інтеграції в моніторинг конвеєра обробки;
- системи виявлення аномалій на основі подій, які є реактивними, а не прогнозуючими, що робить їх неефективними у великомасштабних робочих процесах обробки даних.

Порівняння традиційних та заснованих на штучному інтелекті підходів до астрономічного аналізу даних представлено в Таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння традиційних та на основі штучного інтелекту підходів до астрономічного аналізу даних.

Підхід	Використана AI-модель	Можливості аналізу журналів	Масштабованість	Виявлення аномалій
Astroml	Навчання з учителем	Обмежені	Помірна	Ні
Конвеєр обробки даних TESS	Кластеризація	Помірні	Висока	Ні
Apache airflow	Логіка на основі правил	Високі	Висока	Ні
Запропонований фреймворк	Гібридний AI (правила + машинне навчання)	Розширені	Висока	Так

У цьому розділі автори запропонували фреймворк, який усуває розрив, інтегруючи оцінку журналів у реальному часі, виявлення аномалій на основі штучного інтелекту та автоматизоване виконання рішень для оптимізації обробки астрономічних даних.

Основна частина

Методологія

Архітектура системи.

Запропонований фреймворк – це передова система прийняття рішень на базі штучного інтелекту для інтелектуального аналізу астрономічних даних, розроблена з модульною та масштабованою архітектурою для ефективної обробки величезних та постійно зростаючих наборів великих астрономічних даних.

Завдяки інтеграції інтелектуальної автоматизації, обробки даних у реальному часі та можливостей адаптивного навчання, він оптимізує ефективність робочого процесу, покращує виявлення аномалій та забезпечує надійне прийняття рішень у різних астрономічних дослідницьких програмах.

Архітектура запропонованого фреймворку складається з трьох основних компонентів:

- база даних PostgreSQL для структурованого зберігання журналів;
- модуль прийняття рішень, що використовує моделі штучного інтелекту для оцінки журналів повідомлень та оновлення станів процесів;
- автоматизоване керування робочим процесом для обробки збоїв, тайм-аутів та умов успіху.

Ці компоненти працюють разом, щоб забезпечити ефективну обробку журналів, виявлення аномалій та автоматизоване виконання рішень (рис. 1).

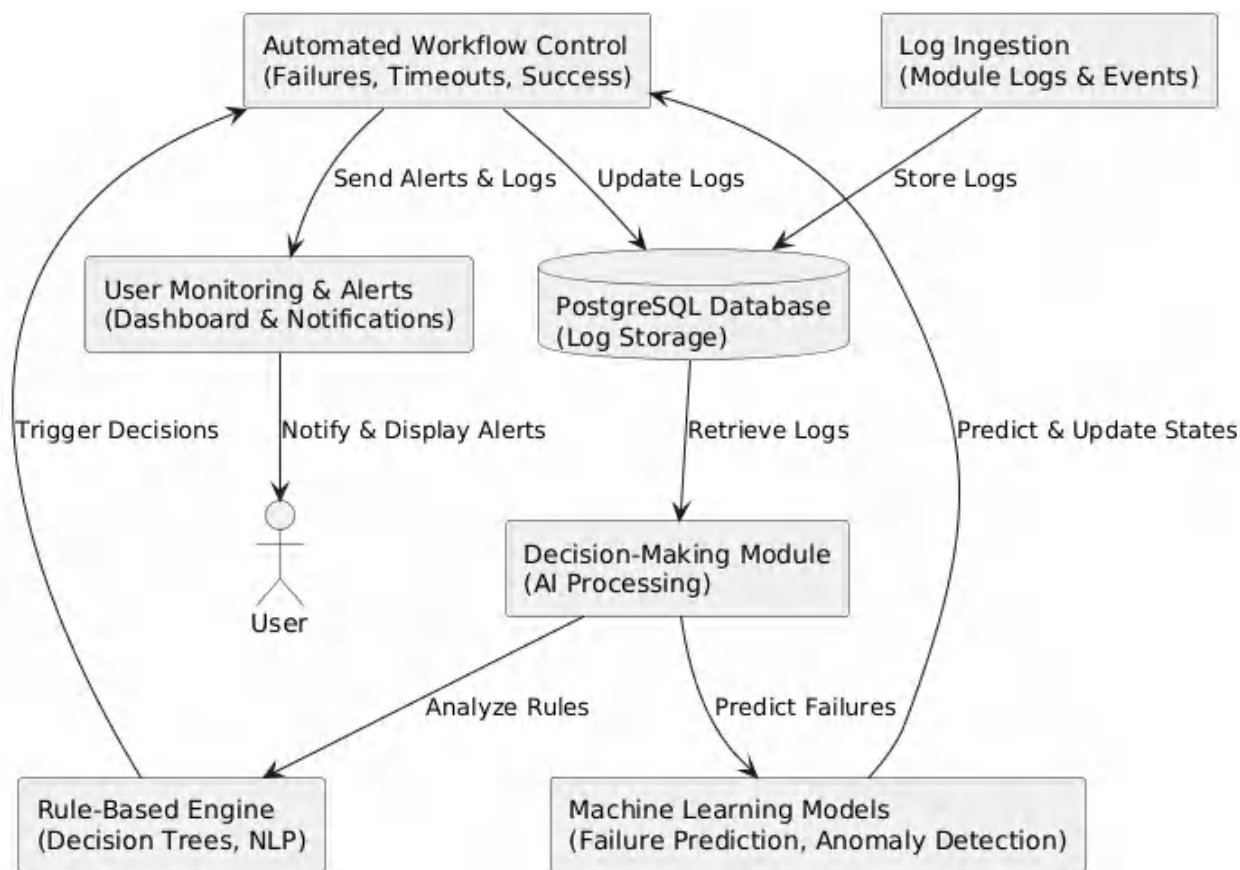


Рисунок 1 – Детальна архітектура системи

Обробка журналів та правила прийняття рішень.

Основою запропонованої структури є модуль прийняття рішень, який відповідає за аналіз повідомлень журналу, визначення станів процесів та визначення відповідних дій.

Модуль працює, використовуючи комбінацію логіки на основі правил, моделей машинного навчання та методів виявлення аномалій.

Ключові методи штучного інтелекту, що використовуються, включають наступне:

– *обробка рішень на основі правил*. Цей підхід використовує попередньо визначені дерева рішень та переходи станів для аналізу повідомлень журналу. Наприклад, якщо виявлено журнал `inputFail`, система негайно припиняє виконання модуля;

– *навчання з учителем для прогнозування збоїв*. Історичні дані журналів використовуються для навчання моделей машинного навчання, таких як випадкові ліси та методи опорних векторів. Ці моделі прогнозують ймовірність збоїв обробки, тайм-аутів або аномалій на основі минулих подій;

– *навчання з підкріпленням для динамічних порогів*. Цей метод адаптує тайм-аути, толерантність до помилок та стратегії повторних спроб у режимі реального часу на основі продуктивності системи. Штучний інтелект навчається на основі своїх минулих результатів рішень та відповідно уточнює відповіді системи.

– *NLP для класифікації журналів*. NLP дозволяє витягувати шаблони з текстових повідомлень журналу, що полегшує категоризацію помилок, попереджень та успіхів. Цей підхід допомагає виявляти рідкісні випадки невдач, які можуть вислизнути з традиційної логіки на основі правил.

Модуль прийняття рішень обробляє вхідні журнали відповідно до попередньо визначених правил на основі штучного інтелекту, забезпечуючи ефективну обробку помилок та автоматизацію процесів за допомогою наступного робочого процесу.

1. Моніторинг початку та завершення процесу:

– коли виявляється журнал `startModule`, починається відстеження процесу;
– якщо отримано повідомлення `endModule`, процес позначається як завершений;

2. Виявлення збоїв на основі тайм-ауту:

– якщо протягом попередньо визначеного інтервалу не надходять повідомлення журналу, процес позначається як зупинений;
– реєструється повідомлення про завершення;

3. Переходи станів:

– повідомлення журналу, такі як `startProcess`, `inputPass`, `outputFail`, запускають автоматичні зміни стану в базі даних, забезпечуючи оновлення в режимі реального часу;

4. Виявлення аномалій:

– система виявляє невідповідності, такі як стан обробки, що залишається незмінним протягом тривалого часу, та позначає їх для перегляду;

– моніторинг;

– взаємодія з користувачем.

Запропонований фреймворк обробляє журнали у п'ять послідовних етапів.

1. *Ініціювання процесу та ведення журналу*: кожна зона обробки даних генерує записи журналу, що зберігаються в базі даних PostgreSQL, відстежуються такі повідомлення журналу, як `startModule`, `inputPass` та `endProcessFail`.

2. *Виявлення аномалій на основі штучного інтелекту*: модель контрольованого випадкового лісу прогнозує ймовірності збоїв на основі історичних даних журналу:

$$P_{\text{failure}} = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де x_i представляє витягнуті ознаки журналу.

3. *Виявлення помилок на основі тайм-ауту*: якщо повідомлення не надходять у межах попередньо визначеного порогу, система обчислює наступне:

$$T_{\text{stalled}} = T_{\text{current}} - T_{\text{lastMessage}}, \quad (2)$$

де T_{current} та $T_{\text{lastMessage}}$ – це час поточного та останнього повідомлень у журналі, якщо $T_{\text{stalled}} > T_{\text{threshold}}$, генерується запис журналу про завершення.

4. Навчання з підкріпленням для адаптивного прийняття рішень динамічно налаштовує інтервали повторних спроб та механізми обробки помилок на основі продуктивності системи.

5. *Попередження користувачів та виконання рішень*: після виявлення аномалії панель моніторингу попереджає користувачів та реєструє кінцевий перехід стану в базі даних.

Моніторинг та взаємодія з користувачем.

Запропонована структура забезпечує інтерфейс моніторингу в режимі реального часу, який дозволяє користувачам відстежувати стан обробки, перевіряти журнали та вручну скасовувати рішення, якщо необхідно.

Панель моніторингу містить кілька ключових функцій, що розширюють її функціональність та зручність використання. Вона забезпечує візуалізацію журналів у режимі реального часу, відображаючи вхідні повідомлення, стани обробки та сповіщення про аномалії.

Користувачі мають можливість фільтрувати ці візуалізації за зоною, модулем та типом повідомлення, тим самим забезпечуючи індивідуальне розуміння системної діяльності.

Крім того, панель моніторингу містить автоматизовану систему сповіщень, яка оперативно інформує користувачів про різні аномалії, збої та тривалі процеси через різні канали, включаючи електронну пошту, веб-сповіщення та інтеграцію із зовнішніми інтерфейсами прикладного програмування (API).

Крім того, користувачі мають можливість вручну втручатися в процеси, маючи опції перезапуску завершених модулів, зміни порогів або схвалення рішень, згенерованих штучним інтелектом.

Усі ручні втручання ретельно документуються, що сприяє оптимізації системи та прийняттю рішень у майбутньому.

Панель моніторингу також дозволяє налаштовувати параметри користувачем, дозволяючи налаштовувати правила прийняття рішень, тайм-аути та фільтрацію повідомлень.

Ця адаптивність ще більше посилюється можливістю динамічного налаштування порогів штучного інтелекту на основі поточного навантаження системи, забезпечуючи оптимальну продуктивність.

Реалізація

Структура бази даних

Запропонований фреймворк використовує базу даних PostgreSQL для структурованого ведення журналу, відстеження процесів та прийняття рішень.

Схема складається з кількох взаємопов'язаних таблиць, які зберігають інформацію про зони, повідомлення, стани обробки та правила прийняття рішень.

Структура бази даних включає такі основні таблиці:

– Таблиця *control.zonestates* представляє стан обробки зони, відстежуючи різні етапи від створення до завершення (табл. 2);

– Таблиця *control.zones* відстежує окремі зони обробки даних, включаючи позначки часу для початку та завершення обробки (табл. 3);

– Таблиця *control.keywords* містить попередньо визначені ключові слова (табл. 4), що використовуються для класифікації журналів та виявлення аномалій (табл. 5);

– Таблиця *control.messages* визначає типи повідомлень, які дозволені для обробки (табл. 6);

– Таблиця *control.messages* реєструє всі системні повідомлення, включаючи позначки часу, пов'язані модулі та ключові слова (табл. 7);

– Таблиця *control.version* зберігає метадані версій для оновлень системи та сумісності модулів (табл. 8).

Таблиця 2 – Таблиця *control.zonestates*

Стовпець	Тип	Опис
id	integer	Унікальний ідентифікатор стану
name	varchar(20)	Назва стану

Таблиця 3 – Таблиця *control.zones*

Стовпець	Тип	Опис
Id	bigint	Унікальний ідентифікатор зони
zonepath	varchar(200)	Шлях до зони обробки даних
startprocessingdate	timestamp	Час початку обробки
endprocessingdate	timestamp	Час завершення обробки
zonestateid	integer	Зовнішній ключ до <i>control.zonestates</i>
trackscout	integer	Кількість оброблених треків

Таблиця 4 – Таблиця *control.keywords* з визначеннями ключових слів

Стовпець	Ключове слово	Опис
1	startModule	Початок виконання модуля
2	inputPass	Вхідні дані успішно пройшли перевірку
3	inputFail	Перевірка вхідних даних не пройдена
4	startProcess	Початок обробки даних

Продовження таблиці 4

Стовпець	Ключове слово	Опис
5	endProcessPass	Обробка успішно завершена
6	endProcessFail	Помилка під час обробки
7	outputPass	Вихідні дані успішно пройшли перевірку
8	outputFail	Перевірка вихідних даних не пройдена
9	endModule	Завершення виконання модуля
10	startZone	Початок обробки зони
11	endZone	Завершення обробки зони
12	none	Загальне повідомлення, яке ігнорується AI
13	terminated	Процес не завершився вчасно та був примусово зупинений

Таблиця 5 – Таблиця control.keywords

Стовпець	Тип	Опис
id	integer	Унікальний ідентифікатор ключового слова
name	varchar(200)	Текст ключового слова

Таблиця 6 – Таблиця control.messages

Стовпець	Тип	Опис
id	integer	Унікальний ідентифікатор типу повідомлення
name	varchar(20)	Назва типу повідомлення

Таблиця 7 – Таблиця control.messages

Стовпець	Тип	Опис
id	bigserial	Унікальний ідентифікатор повідомлення
messagetypeid	integer	Зовнішній ключ до control.messages
modulename	varchar(200)	Назва модуля, що створив повідомлення
zoneid	bigint	Зовнішній ключ до control.zones
message	varchar(400)	Текст повідомлення
messagedate	timestamp	Дата та час повідомлення
pid	integer	Ідентифікатор процесу (PID), пов'язаний з повідомленням

Таблиця 8 – Таблиця control.version

Стовпець	Тип	Опис
major	integer	Старша частина версії (X.**.*)
minor	integer	Мінорна частина версії (*.X.**.*)
build	integer	Номер збірки (*.*.XX.*)
revision	integer	Номер ревізії (*.*.*.XXX)

Діаграма «сутність-зв'язок» (ERD), яка ілюструє схему бази даних, представлена на рисунку 2.

Кілька функцій бази даних допомагають у динамічному отриманні ідентифікаторів зон, оновленні станів та обробці журналів:–

– Функція *BigInt GetZoneId*(varchar(255) zonePath) створює новий запис у control.zones, якщо зона не існує, та повертає її ідентифікатор. В іншому випадку, якщо зона вже існує, вона повертає існуючий ідентифікатор, який слід використовувати під час вставки нового запису в таблицю control.messages (поле zoneId);

– Функція `void StartZoneProcessing(bigint zoneID, int fiscount)` оновлює `startProcessingDate`, скидає `endProcessingDate`, встановлює `trackscout` на нуль та змінює `zonestateid` на `Processing` (якщо зони з ідентифікатором не знайдено, оновлення не виконується);

– Функція `void EndZoneProcessing(bigint zoneID, int state, int trackscout)` оновлює `endProcessingDate`, `zonestateid` та `trackscout` на основі результатів завершення (якщо зони з ідентифікатором не знайдено, оновлення не виконується);

– Функція `void UpdateZoneState(bigint zoneID, int state)` змінює `zonestateid`, щоб відобразити поточний стан обробки (якщо зони з ідентифікатором не знайдено, оновлення не виконується).

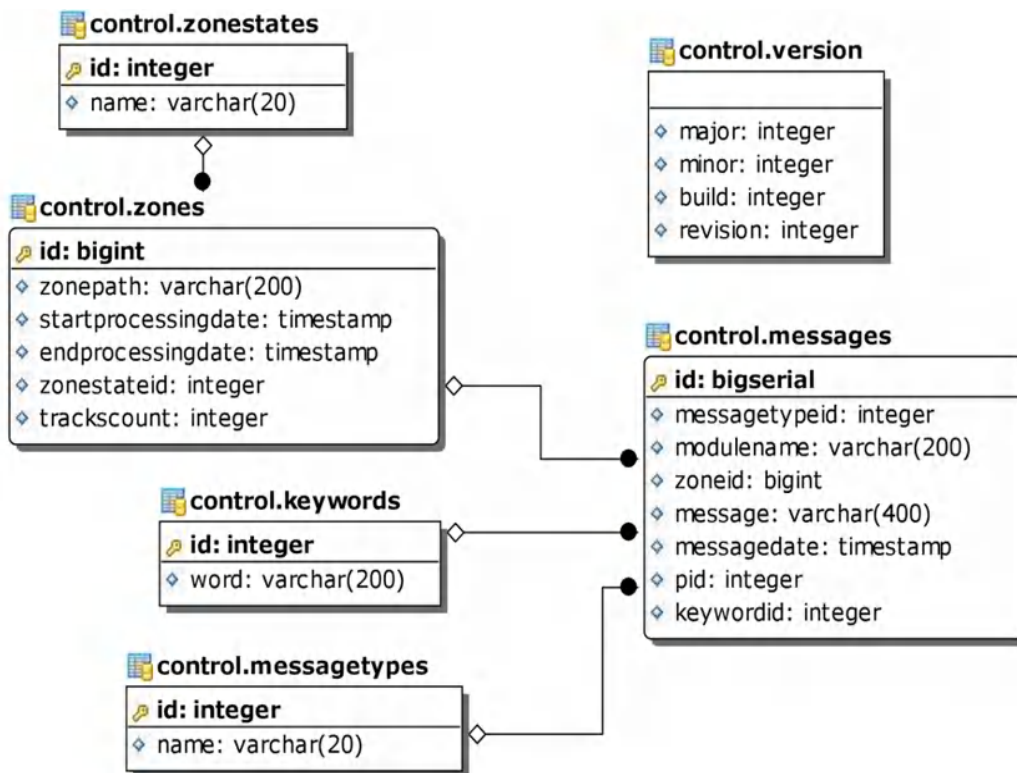


Рисунок 2 – Схема бази даних

Модель прийняття рішень на основі штучного інтелекту.

Наш процес прийняття рішень використовує гібридний підхід, який поєднує системи на основі правил для структурованої логіки та інтерпретації з моделями машинного навчання для адаптивного розпізнавання образів та прогнозу аналітики, забезпечуючи як точність, так і гнучкість обробки складних астрономічних даних:

– обробка природної мови витягує шаблони з повідомлень журналу для виявлення аномалій;

– дерева рішень та випадкові ліси прогнозують ймовірність завершення процесу та позначають збої;

– навчання з підкріпленням оптимізує прийняття рішень шляхом динамічного коригування порогів на основі історичної ефективності.

Моніторинг та оповіщення в режимі реального часу.

Веб-панель моніторингу пропонує візуалізацію станів процесів, оповіщення про збої та аналітику журналів. Вона підтримує ручне втручання, дозволяючи дослідникам змінювати рішення ШІ за потреби.

Ця комплексна панель інструментів є незамінним інструментом для організацій, які покладаються на процеси на основі ШІ. Вона забезпечує візуалізацію станів процесів у режимі реального часу, що дозволяє миттєво розуміти складні потоки даних.

Розширені оповіщення про збої негайно повідомляють користувачів про будь-які аномалії або збої в продуктивності системи. Динамічний та зручний інтерфейс дозволяє користувачам заглиблюватися в аналітику журналів, пропонуючи уявлення про історичні дані та тенденції для прогнозного обслуговування та прийняття обґрунтованих рішень.

Однією з ключових функцій є підтримка панеллю інструментів ручного втручання. Хоча системи ШІ автономно керують операціями, панель інструментів дає змогу дослідникам та операторам змінювати рішення ШІ за потреби. Це гарантує, що людський нагляд залишається важливою частиною операційного робочого процесу, дозволяючи експертам застосовувати свої судження в ситуаціях, коли ШІ може дати збій, наприклад, при інтерпретації нюансованих даних або реагуванні на неочікувані сценарії.

Крім того, панель інструментів можна налаштувати відповідно до різноманітних промислових вимог, підтримуючи різні вхідні та вихідні дані та масштабуючи її для адаптації до зростаючих потреб організації. Він оснащений надійними протоколами безпеки для захисту конфіденційних даних, збереження конфіденційності та цілісності.

Як результат, цей інструмент підвищує операційну ефективність та сприяє довірі до технологій штучного інтелекту, забезпечуючи прозорість та підзвітність в автоматизованих процесах.

Впровадження робочого процесу.

Запропонована структура автоматизує робочий процес за допомогою механізму прийняття рішень на основі штучного інтелекту, який відстежує журнали в режимі реального часу. Модуль прийняття рішень оцінює журнали введення, обробки та виведення, використовуючи попередньо визначені правила та моделі машинного навчання для оптимізації робочого процесу. Цей структурований підхід забезпечує такі переваги:

- ефективна обробка помилок забезпечує негайне виявлення та реєстрацію збоїв обробки;
- автоматизоване прийняття рішень динамічно визначає, чи повторювати, ескалювати або припиняти обробку;
- підтримка масштабованості обробки великих обсягів астрономічних даних з мінімальним ручним втручанням.

Рисунок 3 візуально ілюструє робочий процес прийняття рішень.

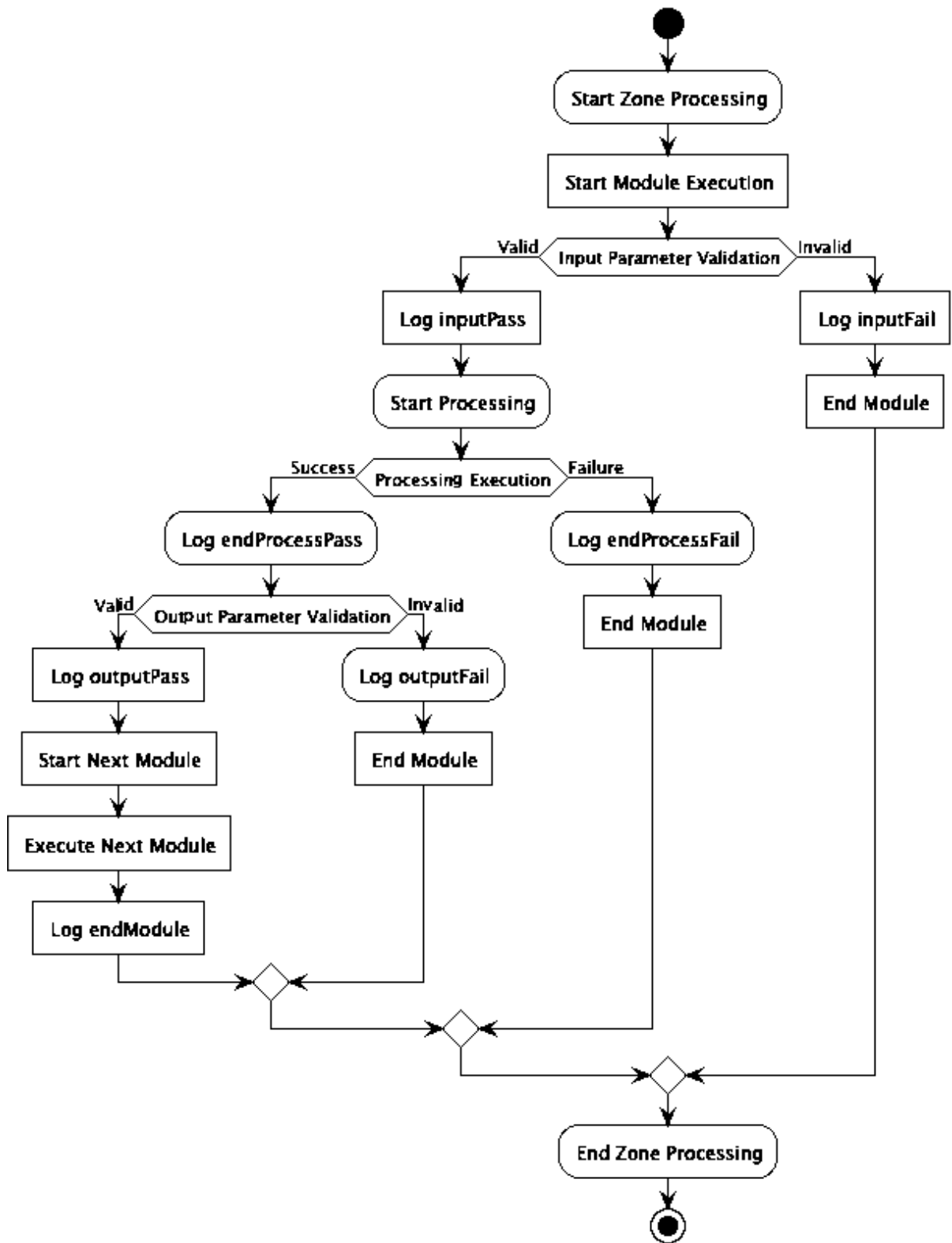


Рисунок 3 – Робочий процес прийняття рішень

Запропонована структура, розроблена з максимальною ретельністю, включає широкий набір функцій, призначених для підвищення ефективності та точності обробки даних в астрономічних конвеєрах.

Окрім основних можливостей прийняття рішень, система надає розширені функції для керування та аналізу повідомлень журналу.

Система дозволяє користувачам сортувати та очищувати повідомлення бази даних, гарантуючи, що для обробки зберігаються лише відповідні та структуровані дані.

Це усуває надлишкові або застарілі записи, тим самим зменшуючи захащення бази даних та оптимізуючи продуктивність запитів.

Крім того, запропонована структура включає механізми фільтрації, які дозволяють користувачам уточнювати повідомлення на основі певних критеріїв, таких як зони, типи повідомлень або стани обробки.

Цей вибірковий процес пошуку оптимізує ефективність робочого процесу, дозволяючи операторам зосередитися на критично важливій інформації.

Ще однією важливою особливістю є функція динамічного ручного оновлення, яка дозволяє користувачам оновлювати відображені повідомлення в режимі реального часу. Це гарантує, що найновіші записи журналу завжди доступні для перегляду.

Крім того, система підтримує пошук повідомлень на основі зон, що дозволяє користувачам перевіряти журнали, пов'язані з певними зонами обробки даних. Це полегшує налагодження та усунення несправностей, надаючи інформацію про локалізовані події обробки.

Для покращення взаємодії з користувачем та адаптивності системи запропонована структура включає модуль налаштувань, що дозволяє користувачам налаштовувати порогові значення, рівні реєстрації, правила тайм-ауту та параметри обробки.

Ці налаштування гарантують, що систему можна адаптувати до різноманітних операційних вимог та потреб досліджень.

Завдяки інтеграції цих розширених функцій сортування, фільтрації, ручного оновлення, пошуку на основі зон та налаштувань користувача, запропонована структура пропонує надійне та масштабоване рішення для автоматизації та оптимізації прийняття рішень у робочих процесах інтелектуального аналізу астрономічних даних.

Результати досліджень

Результати та обговорення

Порівняння з іншими системами.

Запропонована структура вдосконалює традиційні системи моніторингу на основі журналів, інтегруючи можливості прийняття рішень на основі штучного інтелекту.

Ця інтеграція поєднує сильні сторони логіки на основі правил та навчання на основі штучного інтелекту, що забезпечує підвищену гнучкість, покращене виявлення збоїв та зменшення втручання людини.

Нижче наведено порівняння з іншими поширеними методами (табл. 9).

Таблиця 9 – Порівняння традиційних та AI-орієнтованих підходів до аналізу журналів

Характеристика	Традиційне логування на основі правил	AI-орієнтоване виявлення аномалій	Запропонований фреймворк
Обробка журналів	Ручна фільтрація логів	Класифікація логів за допомогою AI	Повністю автоматизоване прийняття рішень
Виявлення збоїв	На основі попередньо визначених правил	Розпізнавання шаблонів за допомогою ML	Гібридний підхід: ML + правила
Участь користувача	Високий рівень ручного контролю	AI-сповіщення з обмеженим керуванням	AI-керування з можливістю ручного втручання
Масштабованість	Обмежена складністю правил	Масштабується зі збільшенням навчальних даних	Повністю масштабована з оптимізацією бази даних
Моніторинг у реальному часі	Базове відстеження подій	AI-керовані сповіщення	Інтерактивна панель з динамічними налаштуваннями

Покращення масштабованості.

Запропонована структура розроблена для ефективної обробки великомасштабних астрономічних наборів даних, зберігаючи при цьому низьку затримку, високу точність та відмовостійкість.

Зі зростанням обсягу даних спостережень система повинна обробляти зростаючу кількість записів журналу, підтримувати прийняття рішень у режимі реального часу та забезпечувати надійне виконання завдань обробки даних.

Масштабованість досягається за допомогою методів індексації бази даних, секціонування та кешування. Система використовує індекс B-tree в PostgreSQL для прискорення часу пошуку журналів, зменшуючи складність запитів з $O(n)$ до $O(\log n)$.

Наприклад, набір даних, що містить 10 мільйонів записів журналу, індексується менш ніж за 2 секунди, порівняно з неіндексованим запитом, який займає понад 30 секунд.

Для подальшого підвищення масштабованості реалізовано горизонтальне секціонування шляхом сегментації журналів на основі зон обробки та позначок часу. Під час одночасної обробки 100 зон, кожна з яких генерує 1000 записів журналу за хвилину, секціонування гарантує, що запити залишаються ефективними, запобігаючи уповільненню роботи бази даних.

У реальних сценаріях запропонований фреймворк був протестований в рамках проекту Collection Light Technology (CoLiTec) [31] з набором даних астрономічних спостережень, що складається з 50 000 журналів на годину, що демонструє скорочення часу виконання запитів на 45% завдяки кешуванню та оптимізованим стратегіям індексування.

Оптимізація продуктивності.

Тести продуктивності [32] показують, що запропонований фреймворк значно перевершує традиційні системи журналювання на основі правил.

Модуль прийняття рішень на основі штучного інтелекту покращує точність виявлення помилок, використовуючи комбінацію методів навчання з учителем та виявлення аномалій.

Ефективність системи можна кількісно оцінити за допомогою метрик зменшення затримки. Загальний час прийняття рішень моделюється як:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{query}} + T_{\text{analysis}} + T_{\text{decision}}, \quad (3)$$

де T_{query} – час, необхідний для отримання даних журналу з бази даних;

T_{analysis} – час, необхідний для обробки журналів за допомогою моделей штучного інтелекту;

T_{decision} – час виконання для генерації остаточної відповіді системи.

Для астрономічного набору даних із 500 000 журналів традиційні системи на основі правил потребують середнього часу обробки 520 мс, тоді як запропонована структура зменшує його до 180 мс, демонструючи покращення на 65%.

Система покращує автоматизоване відновлення після збоїв, використовуючи методи навчання з підкріпленням для динамічного коригування стратегій обробки помилок. Якщо модуль обробки виходить з ладу, запропонована структура оцінює історичні моделі збоїв та визначає, чи повторити спробу виконання, ескалювати проблему або завершити роботу модуля.

Наприклад, у наборі даних, де 5% модулів обробки стикаються з неочікуваними збоями, запропонована структура зменшує час вирішення збоїв з 30 хвилин до менш ніж 10 хвилин шляхом автоматизації процесів відновлення.

Ефективність цього підходу вимірюється за допомогою рівняння середнього часу до відновлення (MTTR):

$$\tau_{\text{repair}} = \frac{\sum T_{\text{repair}}}{N_{\text{failures}}}, \quad (4)$$

де T_{repair} – час, необхідний для усунення кожної помилки;

N_{failures} – загальна кількість спостережуваних помилок.

Завдяки навчанню з підкріпленням, MTTR зменшується на 50%, що значно покращує час безвідмовної роботи системи.

Приклад використання.

Розглянемо застосування, в якому запропонована структура розгорнута для моніторингу масиву радіотелескопів, що збирає сигнали від об'єктів глибокого космосу. Система обробляє 300 ГБ необроблених даних на день, генеруючи 2 мільйони повідомлень журналу, пов'язаних з калібруванням сигналу, фільтрацією шуму та виявленням аномалій.

Без оптимізації традиційні системи обробки журналів вимагають приблизно 5 секунд на запит, що робить прийняття рішень у режимі реального часу непрактичним. Завдяки підходу на основі штучного інтелекту в запропонованій структурі час запитів скорочується до 1,2 секунди, що дозволяє майже миттєво реагувати на аномалії, такі як неочікувані падіння сигналу або несправності датчиків.

Поєднуючи високопродуктивне прийняття рішень за допомогою штучного інтелекту, масштабовані структури баз даних та методи адаптивного навчання, запропонована структура гарантує, що система залишається надійною, ефективною та здатною обробляти зростаючі вимоги сучасних астрономічних досліджень.

Для підсумування результатів експерименту було проаналізовано такі критерії:

- скорочення часу обробки (чим нижче, тим краще): запропонована структура значно скорочує час обробки, досягаючи покращення на 65%;
- автоматичне відновлення після збоїв (чим вище, тим краще): запропонована структура покращує ефективність відновлення після збоїв на 50%;
- точність виявлення помилок (чим вище, тим краще): традиційні системи на основі правил мають точність 72%, тоді як запропонована структура підвищує її до 92% за допомогою виявлення аномалій на основі штучного інтелекту;
- скорочення часу простою системи (чим нижче, тим краще): запропонована структура скорочує час простою на 50%, забезпечуючи кращу доступність системи.

Висновки

У статті представлено систему прийняття рішень на основі штучного інтелекту для автоматизованої оцінки каротажу, виявлення аномалій та моніторингу процесів під час процесу астрономічного аналізу даних.

Дослідження продемонструвало, що інтеграція прийняття рішень на основі штучного інтелекту зі структурованою системою реєстрації значно підвищує ефективність та надійність різних типів обробки астрономічних даних, таких як пошук знань у базах даних, аналіз даних, розпізнавання зображень [33], машинний зір [34], фільтрація зображень [35, 36], виявлення об'єктів [37, 38] тощо.

Гібридний підхід, що базується на правилах, та підхід на основі штучного інтелекту, виявився дуже ефективним, досягши суттєвого покращення швидкості прийняття рішень та часу відновлення після збоїв. Запропонований процес прийняття рішень є суттєвим кроком у розвитку конвеєрів астрономічного аналізу даних.

Автоматизуючи виявлення аномалій та оптимізуючи управління робочим процесом, запропонована система мінімізує ручне втручання та підвищує надійність аналізу великомасштабних спостережних даних.

Вирішуючи критичні проблеми та використовуючи машинне навчання [39], фреймворк підвищує як ефективність, точність, так і швидкість передачі даних.

Ці досягнення відкривають шлях для більш ефективної обробки даних в астрономічних дослідженнях, підтримуючи виявлення та класифікацію небесних явищ з більшою точністю.

Запропонований гібридний підхід на основі правил + штучний інтелект продемонстрував покращення швидкості прийняття рішень на 65% та скорочення часу відновлення після збоїв на 50% порівняно з традиційним моніторингом на основі правил [40].

Подальша робота буде зосереджена на вдосконаленні моделей штучного інтелекту, розширенні адаптивності до різноманітних наборів даних та подальшій інтеграції автоматизації прийняття рішень у ширші системи обробки астрономічних даних [41].

Також автори планують зосередитися на масштабуванні конвеєра для ще більших наборів даних та включенні додаткових джерел даних для подальшої перевірки його ефективності [42, 43]. Також буде корисною вдосконалена децентралізована багатовузлова розподілена обробка для аналізу журналів у режимі реального часу.

Список літератури.

1. Troianskyi, V., Godunova, V., Serebryanskiy, A., Aimanova, G., Franco, L., et al. (2024). Optical observations of the potentially hazardous asteroid (4660) Nereus at opposition 2021. *Icarus*, 420, 116146. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2024.116146>
2. Khlamov, S., et al. (2024). Automated data mining of the reference stars from astronomical CCD frames. *CEUR Workshop Proceedings*, 3668, 83-97.
3. Romanenkov, Y., Mukhin, V., Kosenko, V., et al. (2024). Criterion for ranking interval alternatives in a decision-making task. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 16(2), 72-82. <https://doi.org/10.5815/ijmecs.2024.02.06>
4. Wagner, M., Helal, H., Roepke, R., Judel, S., Doveren, J., et al. (2022). A combined approach of process mining and rule-based AI for study planning and monitoring in higher education. *Lecture Notes in Business Information Processing*. Vol. 468. (p. 513-525). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27815-0_37.
5. Faaïque, M. (2023). Overview of big data analytics in modern astronomy. *International Journal of Mathematics, Statistics, and Computer Science*, 2, 96-113. <https://doi.org/10.59543/ijmscs.v2i.8561>.
6. Schönig, H. (2023). *Mastering PostgreSQL 15: Advanced techniques to build and manage scalable, reliable, and fault-tolerant database applications*. Packt Publishing.
7. Khlamov, S., et al. (2022). Astronomical knowledge discovery in databases by the CoLiTec software. *12th IEEE International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. (p. 583-586). <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913188>.
8. Zhernova, P., et al. (2019). Data stream clustering in conditions of an unknown amount of classes. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 754. (p. 410-418). https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_41.
9. Dmitrieva, E. (2023). Integration of artificial intelligence in market analysis to address socioeconomic disparities in investment decisions. *Futurity of Social Sciences*, 1(4), 102-120. <https://doi.org/10.57125/FS.2023.12.20.6>.

10. Savanevych, V., et al. (2023). Mathematical methods for an accurate navigation of the robotic telescopes. *Mathematics*, 11(10), 2246. <https://doi.org/10.3390/math11102246>.
11. Yuriy, R., Tatarina, O., Kaminsky, V., Silina, T., & Bashkirova, L. (2024). Modern methods and prospects for using artificial intelligence in disease diagnostics: A narrative review. *Futurity Medicine*, 3(4). <https://doi.org/10.57125/FEM.2024.12.30.02>.
12. Kirichenko, L., et al. (2023). Application of wavelet transform for machine learning classification of time series. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Vol. 149. (p. 547-563). https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_31.
13. Bashkirova, L., Kit, I., Havryshchuk, Y., et al. (2024). Comprehensive review of artificial intelligence in medical diagnostics and treatment: Challenges and opportunities. *Futurity Medicine*, 3(3), 68-80. <https://doi.org/10.57125/FEM.2024.09.30.07>.
14. Troianskyi, V., Kashuba, V., Bazyey, O., et al. (2023). First reported observation of asteroids 2017 AB8, 2017 QX33, and 2017 RV12. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 53, 5-15. <https://doi.org/10.31577/caosp.2023.53.2.5>.
15. Khlamov, S., et al. (2022). Statistical modeling for the near-zero apparent motion detection of objects in series of images from data stream. *12th IEEE International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. (p. 126-129). <https://doi.org/10.1109/ACIT54803.2022.9913151>.
16. Abdel-Basset, M., Mohamed, R., Azeem, S. A. A., et al. (2023). Kepler optimization algorithm: A new metaheuristic algorithm inspired by Kepler's laws of planetary motion. *Knowledge-Based Systems*, 268, 110454. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.110454>.
17. Rao, S., Mahabal, A., Rao, N., & Raghavendra, C. (2021). Nigraha: Machine-learning-based pipeline to identify and evaluate planet candidates from TESS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 502(2), 2845–2858. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab203>.
18. Khlamov, S., Tabakova, I., & Trunova, T. (2022). Recognition of the astronomical images using the Sobel filter. *29th IEEE International Conference on Systems, Signals, and Image Processing (IWSSIP 2022)*. (p. 1-4). <https://doi.org/10.1109/IWSSIP55020.2022.9854425>.
19. Martovytskyi, V., et al. (2023). Developing a risk management approach based on reinforcement training in the formation of an investment portfolio. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3-122), 106-116. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277997>.
20. Rychka, R. (2024). Artificial intelligence to predict solar energy production: Risks and economic efficiency. *Futurity Economics & Law*, 4(2), 100-111. <https://doi.org/10.57125/FEL.2024.06.25.06>.
21. Akhmetov, V., et al. (2019). Cloud computing analysis of Indian ASAT test on March 27, 2019. *IEEE International Scientific-Practical Conference: Problems of Infocommunications Science and Technology*. (p. 315-318). <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061243>.
22. Bingham, C. (2024). Education and artificial intelligence at the scene of writing: A Derridean consideration. *Futurity Philosophy*, 3(4), 34-46. <https://doi.org/10.57125/FP.2024.12.30.03>.
23. Prokopenko, O., & Sapinski, A. (2024). Using virtual reality in education: Ethical and social dimensions. *E-Learning Innovations Journal*, 2(1), 41-62. <https://doi.org/10.57125/ELIJ.2024.03.25.03>.
24. Mehdaoui, A. (2024). Unveiling barriers and challenges of AI technology integration in education: Assessing teachers' perceptions, readiness and anticipated resistance. *Futurity Education*, 4(4), 95-108. <https://doi.org/10.57125/FED.2024.12.25.06>.
25. Khlamov, S., & Savanevych, V. (2020). Big astronomical datasets and discovery of new celestial bodies in the Solar System in automated mode by the CoLiTec software. *Knowledge discovery in big data from astronomy and earth observation: Astrogeoinformatics*. (p. 331-345). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819154-5.00030-8>.
26. Khlamov, S., Tabakova, I., Trunova, T., & Deineko, Z. (2022). Machine vision for astronomical images using the Canny edge detector. *CEUR Workshop Proceedings*, 3384, 1-10.
27. Kirichenko, L., et al. (2020). Generalized approach to analysis of multifractal properties from short time series. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(5), 183-198. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0110527>.

28. Dadkhah, M., et al. (2019). Methodology of wavelet analysis in research of dynamics of phishing attacks. *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms*, 12(3-4), 220-238. <https://doi.org/10.1504/IJAIP.2019.098561>.
29. AstroML. (2025). Machine learning and data mining for astronomy. <https://www.astroml.org>.
30. Haines, S. (2022). Workflow orchestration with Apache Airflow. *Modern data engineering with Apache Spark*. (p. 255-295). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-7452-1_8.
31. Khlamov, S., et al. (2024). Machine vision for astronomical images using the modern image processing algorithms implemented in the CoLiTec software. *Measurements and Instrumentation for Machine Vision*. Chap. 12. (p. 269-310). CRC Press, Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781003343783-12>.
32. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., Trunova, T., & Teslenko, Y. (2025). Performance percentile analysis for API-based testing. *Information control systems and intelligent technologies. Achievements and applications*. Section 2 “Intelligent systems and data analysis”. (p. 235-253). Liha-Pres. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-13>.
33. Khlamov, S., et al. (2022). The astronomical object recognition and its near-zero motion detection in series of images by in situ modeling. *29th IEEE International Conference on Systems, Signals, and Image Processing (IWSSIP 2022)*. (p. 1-4). <https://doi.org/10.1109/IWSSIP55020.2022.9854475>
34. Gonzalez, R.C., & Woods, R.E. (2018). *Digital image processing (4th ed.)*. Pearson.
35. Vlasenko, V., et al. (2024). Devising a procedure for the brightness alignment of astronomical frames background by a high frequency filtration to improve accuracy of the brightness estimation of objects. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2-128), 31-38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301327>.
36. Khlamov, S., et al. (2023). Development of the matched filtration of a blurred digital image using its typical form. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(9-121), 62-71. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.273674>.
37. Savanevych, V., et al. (2018). A method of immediate detection of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames. *Astronomy & Astrophysics*, 609, A54. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630323>.
38. Mykhailova, L., et al. (2014). Method of maximum likelihood estimation of compact group objects location on CCD-frame. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4), 16-22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.28028>.
39. Bodyanskiy, Y., Popov, S., Brodetskyi, F., & Chala, O. (2022). Adaptive least-squares support vector machine and its combined learning–selflearning in image recognition task. *International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. (p. 48-51). <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000518>.
40. Lyashenko, V., Abu-Jassar, A.T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated monitoring and visualization system in production. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 5(6), 9-18. <https://doi.org/10.54392/irjmt2362>.
41. Savanevych, V., et al. (2015). Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 31(6), 302-313.
42. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., & Deineko, Z. (2025). Comparative analysis of JMeter and Postman for API-based performance testing. *CEUR Workshop Proceedings*, 4048, 426-440. <https://ceur-ws.org/Vol-4048/paper34.pdf>.
43. Khlamov, S., Mendieliava, M., Vovk, O., Deineko, Z., & Lytvynenko, S. (2025). Analysis of performance metrics for load testing tools. In *Information control systems and intelligent technologies. Achievements and applications*. Section 2 “Intelligent systems and data analysis”. (p. 211-235). Liha-Pres. <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-12>.

ПРОЕКТУВАННЯ КОГНІТИВНО-АДАПТИВНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРАКТИВНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ НА ОСНОВІ ШІ

Олійник В.М.

аспірант, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0002-5584-1531

Бізюк А.В.

кандидат технічних наук, доцент,
професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-9830-9206

***Анотація.** У розділі обґрунтовано концепцію когнітивно-адаптивного інтерфейсу для систем інтерактивного моделювання сценаріїв на основі ШІ. Показано обмеження Chat UI та доцільність переходу до human-in-the-loop архітектури з візуальним контролем, вузлами фіксації, маркуванням аномалій і локальною регенерацією сценарію.*

***Ключові слова:** когнітивно-адаптивний інтерфейс, штучний інтелект, великі мовні моделі, human-in-the-loop.*

Вступ

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій у сфері інтерактивних медіа характеризується переходом від інструментальних середовищ до систем інтелектуальної генерації контенту. У сфері цифрових ігор, інтерактивних симуляцій та сценарного моделювання ця тенденція безпосередньо пов'язана з розвитком процедурної генерації контенту, що передбачає автоматизоване створення рівнів, правил, карт, місій, персонажів та інших елементів ігрового або симуляційного середовища [1]. Окремим напрямком є генерація процедурного контенту на основі досвіду, у межах якого автоматизована генерація розглядається не лише як технічне створення об'єктів, а як адаптація контенту до досвіду, дій і когнітивних характеристик користувача [2].

Традиційне проектування складних інтерактивних середовищ, зокрема систем моделювання сценаріїв та варгеймів, в основному базувалося на детермінованих методах. Цей підхід передбачав фіксовані правила пересування ігрових одиниць, визначені штрафи й бонуси, строгі правила «if-then» замість імовірнісних переходів, а також жорсткі сценарні дерева, де кожна гілка сценарію задається явно. У професійній традиції варгеймінгу саме формалізація правил, ролей, умов і процедур є однією з передумов використання гри як інструменту аналізу, навчання або підтримки рішень [3]. Така методологія

забезпечує високий рівень контролю над балансом системи, водночас створюючи бар'єри для масштабованості. Баланс у детермінованих системах не є лінійним: додавання одного фактора, наприклад нового типу техніки, зміни її атрибутів або введення нового правила взаємодії, може порушити логіку всієї системи.

Впровадження великих мовних моделей як центральних генеративних рушіїв змінює парадигму створення медіаконтенту. Замість покрокового моделювання окремих елементів структури користувач переходить до декларативного опису цільового стану системи природною мовою. Великі мовні моделі здатні інтерпретувати високорівневі нарративні описи і перетворювати їх на структуровані набори даних, що визначають ландшафт, тактичні характеристики об'єктів, правила взаємодії та логіку сценарію [4]. У сучасних дослідженнях процедурної генерації контенту зазначається, що інтеграція LLM розширює межі класичних PCG-підходів, оскільки мовні моделі можуть генерувати не лише окремі об'єкти, а й правила, рівні та комплексні сценарні структури [5]. Це дозволяє суттєво скоротити цикл розробки прототипу медіапродукту завдяки спрощенню процесу проектування складних симуляцій.

Проте, прискорення генерації за використанням великих мовних моделей виявило недолік: зростання швидкості створення контенту супроводжується деградацією керованості його внутрішньою логікою. Великі мовні моделі, за своєю стохастичною природою, не гарантують дотримання жорстких топологічних, математичних і балансних обмежень, які є критичними для варгеймів та інших систем інтерактивного моделювання. У дослідженнях галюцинацій LLM підкреслюється, що такі моделі можуть продукувати правдоподібний, але фактично або структурно некоректний зміст, що особливо проблемно для задач, де результат має відповідати формальним правилам і обмеженням [6]. Як наслідок, виникає конфлікт між високою лінгвістичною якістю згенерованого сценарію та його можливою структурною неспроможністю: галюцинаціями об'єктів, порушенням балансу сил, нелогічним розміщенням сутностей на сітці або суперечностями між правилами і нарративним описом.

Особливо гостро ця проблема проявляється у традиційних інтерфейсах взаємодії з ШІ, що здебільшого представлені у вигляді вікна чату. Chat UI є зручним для послідовного діалогу природною мовою, однак він є недостатнім для редагування багатовимірних просторово-нарративних структур. Якщо користувач бачить помилку у згенерованому сценарії, наприклад аномальну концентрацію юнітів у секторі карти, невідповідність типу юніта місцевості або порушення логіки переміщення, текстовий промпт на виправлення часто призводить не до локальної корекції, а до часткової або повної регенерації даних. У такій ситуації виправлення одного елемента може зруйнувати суміжні, вже коректні структури, що змушує користувача повторно перевіряти весь сценарій.

Отже, основна проблема полягає не лише у здатності ШІ генерувати сценарії, а у здатності користувача контролювати, перевіряти й локально

редагувати результати цієї генерації. Для складних інтерактивних медіасистем сценарій не є лінійним текстом: він одночасно містить просторову топологію, параметри об'єктів, правила взаємодії, часову логіку, балансні обмеження та нарративні умови. Подання такого масиву у вигляді тексту, таблиці або сирій JSON/XML-структури створює значне когнітивне навантаження, оскільки користувач змушений самостійно реконструювати просторову модель, виявляти приховані суперечності та оцінювати наслідки кожної зміни.

Це зумовлює необхідність розробки нових моделей людино-машинної взаємодії, які б забезпечили «семантичний міст» між неструктурованим текстом ШІ та жорсткою структурою інтерактивної медіасистеми. Такий інтерфейс має не просто відображати результат генерації, а трансформувати його у зрозумілі для користувача візуальні й семантичні шари: карту, сутності, правила, параметри, конфлікти, зони ризику та можливі точки локального втручання. У межах підходу human-centered artificial intelligence наголошується, що ефективні ШІ-системи мають поєднувати високий рівень автоматизації з високим рівнем людського контролю, а не витіснити користувача з процесу прийняття рішень [7]. Аналогічно, принципи взаємодії людини та штучного інтелекту передбачають, що система повинна підтримувати прозорість стану, можливість корекції, зрозумілий зворотний зв'язок і контроль користувача над результатами автоматизованих дій [8].

У цьому розділі когнітивно-адаптивний інтерфейс розглядається як спосіб подолання обмежень класичного Chat UI у задачах інтерактивного моделювання сценаріїв на основі ШІ. Його ключова функція полягає у збереженні балансу між швидкістю генерації та точністю моделювання: система має дозволяти користувачу бачити структуру сценарію, виявляти аномалії, фіксувати коректні елементи, втручатися у локальні ділянки та запускати часткову корекцію без повної регенерації контексту. Саме така постановка проблеми визначає подальшу логіку дослідження: від аналізу когнітивних обмежень роботи з LLM-сценаріями до проектування human-in-the-loop архітектури, семантичного мапінгу та механізмів локальної корекції інтерактивних сценаріїв.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та розробка концепції когнітивно-адаптивного інтерфейсу для систем інтерактивного моделювання сценаріїв на основі штучного інтелекту. Такий інтерфейс має забезпечувати візуальний контроль над результатами генерації, зменшувати когнітивне навантаження користувача при роботі зі складними масивами даних і підтримувати поелементне редагування сценарію без необхідності повної регенерації контексту.

Об'єктом дослідження є процеси людино-машинної взаємодії, що виникають під час проектування та генерації складних просторово-нарративних сценаріїв із використанням великих мовних моделей. У межах цього

дослідження особлива увага приділяється сценаріям варгеймів, оскільки вони поєднують наративний опис, просторову топологію, параметричні сутності, правила взаємодії та балансні обмеження. Розгляд взаємодії у цьому контексті фокусується на трансформації неструктурованого семантичного вводу у формалізовану структуру ігрового поля, систему об'єктів та набір правил, придатних для візуальної перевірки й подальшого редагування.

Предметом дослідження є сукупність інтерфейсних рішень, методів візуалізації та когнітивних моделей, що забезпечують верифікацію, контроль і локальну корекцію результатів LLM-генерації. Особлива увага приділяється механізмам подолання ефекту «чорної скриньки» через впровадження проміжних шарів маніпуляції даними, які дозволяють людині виступати активним контролером у human-in-the-loop процесі формування інтерактивного сценарію.

Для досягнення поставленої мети визначено такі **задачі дослідження**.

1. Проаналізувати обмеження традиційного чат-інтерфейсу у задачах генерації, перевірки та редагування складних просторово-нاراتивних сценаріїв.

2. Обґрунтувати доцільність застосування human-in-the-loop підходу як принципу збереження контролю користувача над результатами LLM-генерації.

3. Визначити когнітивні чинники, що ускладнюють роботу користувача зі згенерованими сценаріями, зокрема зовнішнє когнітивне навантаження, просторово-семантичний дисонанс і перевантаження сирими даними.

4. Запропонувати модель семантичного мосту між природномовним описом сценарію, структурованою моделлю даних і візуальним інтерфейсом користувача.

5. Описати ключові елементи когнітивно-адаптивного інтерфейсу, що забезпечують візуальну перевірку, фіксацію коректних елементів, виявлення аномалій і локальну корекцію окремих фрагментів сценарію.

6. Здійснити аналітичне порівняння класичного Chat UI та запропонованого когнітивно-адаптивного інтерфейсу за критеріями керованості, когнітивного навантаження, локальності редагування та ризику каскадної регенерації.

Основна частина

1 Когнітивні обмеження роботи з LLM-сценаріями

Проектування медіасистем, що інтегрують великі мовні моделі, потребує врахування не лише технічних можливостей генерації, а й обмежень людського сприйняття. У системах інтерактивного моделювання сценаріїв користувач працює не з окремим текстом, а з багаторівневою структурою, що поєднує наративний опис, просторову топологію, параметри об'єктів, правила взаємодії, часові умови та балансні обмеження. Тому основним ризиком стає не сам факт наявності великого обсягу даних, а спосіб їх подання користувачу. Теорія когнітивного навантаження виходить із того, що робоча пам'ять людини має

обмежену пропускну здатність, а ефективність виконання складних завдань залежить від того, як саме інформація організована й представлена [9]. У подальших роботах ця теорія була розвинена як модель проєктування інформаційних середовищ, що мають знижувати зайве навантаження на користувача й підтримувати побудову коректних ментальних схем [10].

У контексті LLM-сценаріїв загальне когнітивне навантаження користувача можна умовно представити як суму трьох компонентів: внутрішнього, зовнішнього та доречного навантаження (табл. 1). Внутрішнє навантаження визначається об'єктивною складністю сценарію: кількістю типів юнітів, правилами їхньої взаємодії, топологією карти, кількістю умов перемоги, тригерів і балансних обмежень. Це навантаження не може бути повністю усунуте інтерфейсом, оскільки воно є властивістю самої предметної області. Зовнішнє навантаження виникає через спосіб подання інформації: надлишковий текст, неструктуровані відповіді моделі, потребу ручної перевірки JSON/XML-структур, дублювання параметрів або необхідність шукати приховані суперечності у великому масиві згенерованих даних. Доречне навантаження пов'язане з корисною когнітивною роботою користувача: побудовою ментальної моделі сценарію, оцінкою стратегічної логіки, ухваленням рішень щодо балансу та корекції структури.

Таблиця 1 – Компоненти когнітивного навантаження користувача під час роботи з LLM-сценаріями

Компонент навантаження	Джерело виникнення у сценарному моделюванні	Роль інтерфейсу
Внутрішнє навантаження	Складність правил, кількість юнітів, топологія карти, сценарні умови	Не усувається повністю, але може бути структуроване через візуальні шари
Зовнішнє навантаження	Сирий текст, JSON/XML, неструктуровані відповіді LLM, потреба ручної перевірки помилок	Має бути мінімізоване через візуалізацію, фільтрацію та маркування аномалій
Доречне навантаження	Побудова ментальної моделі сценарію, аналіз балансу, прийняття рішень	Має підтримуватися інтерфейсом як продуктивна аналітична робота

Проблема LLM-сценаріїв полягає в тому, що користувач часто змушений витрачати основну частину когнітивних ресурсів не на творче або аналітичне моделювання, а на перевірку цілісності згенерованого результату. Наприклад, сценарій може бути лінгвістично переконливим, але містити логічні або просторові помилки: розміщення важкої техніки на непрохідній місцевості, дублювання одного й того самого юніта в різних секторах, порушення правил видимості або несумісність між описом місії та фактичними умовами перемоги. Такі помилки пов'язані з ширшою проблемою галюцинацій великих мовних моделей, коли модель формує правдоподібний, але фактично або структурно некоректний результат [6]. У сценарних системах ця проблема набуває особливої

ваги, оскільки помилка може бути неочевидною в тексті, але критичною для балансу симуляції.

Фундаментальним когнітивним обмеженням у такій ситуації є просторово-семантичний дисонанс. Йдеться про конфлікт між послідовним характером текстового подання і паралельним характером просторового сприйняття. Текст або JSON-структура змушують користувача послідовно зчитувати окремі параметри, зіставляти їх між собою і внутрішньо реконструювати карту сценарію. Наприклад, запис виду

```
`{"side": "player", "unit": "tank", "coord": "2:3", "terrain": "forest"}`
```

не показує проблему безпосередньо. Користувач має спочатку інтерпретувати тип юніта, потім координату, потім тип місцевості, а після цього співвіднести ці параметри з правилами сценарію. У візуальному інтерфейсі така сама суперечність може бути сприйнята майже миттєво, якщо юніт відображений на карті, а несумісна ділянка підсвічена як конфлікт.

Ця відмінність узгоджується з класичним висновком про те, що діаграмні й просторові репрезентації можуть бути ефективнішими за текстові, оскільки вони роблять частину відношень безпосередньо видимими, а не прихованими в послідовності символів [11]. Для варгейм-сценаріїв це означає, що топологічні дані, зони контролю, радіуси дії, маршрути руху, концентрація сил і конфлікти правил не повинні залишатися лише у текстовому або табличному вигляді. Якщо інтерфейс змушує користувача виконувати «віртуальний рендеринг» карти у власній пам'яті, він переносить на людину ту частину роботи, яку має виконувати UI-шар.

Окремим джерелом перевантаження є надмірна деталізація. Один юніт у сценарній системі може мати десятки параметрів: тип, сторону конфлікту, координати, стан, рівень укріплення, боєздатність, дальність дії, запас ходу, мораль, обмеження видимості, зв'язок із тригерами та залежність від сценарних умов. Якщо всі ці параметри показані одночасно, користувач отримує формально повну, але практично малокеровану картину. У такому випадку зростає ризик «паралічу аналізу», коли кількість доступної інформації ускладнює ухвалення рішення замість того, щоб його підтримувати.

Для зниження такого навантаження доцільно застосовувати стратегію прогресивного розкриття. Її сутність полягає в тому, що інтерфейс показує користувачу не весь масив даних одразу, а лише той рівень деталізації, який потрібний для поточного завдання. У сучасних дослідженнях складних людино-машинних інтерфейсів *progressive disclosure* розглядається як спосіб зменшити навчальне й операційне навантаження через подання функцій та інформації шарами. У контексті LLM-сценаріїв це означає, що дані мають бути організовані щонайменше на трьох рівнях.

Перший рівень - візуальний дескриптор. На цьому рівні користувач бачить основну структуру сценарію: карту, типи сутностей, їхню належність до сторін, базовий стан і просторове розміщення. Другий рівень - контекстні атрибути, які

відкриваються при фокусуванні, виборі юніта або виділенні області. Саме тут доцільно показувати параметри боєздатності, модифікатори місцевості, локальні правила або попередження про конфлікти. Третій рівень - семантичне ядро, тобто повний опис згенерованої структури: вихідний промпт, JSON/XML-представлення, історія змін і службові параметри моделі. Цей рівень має бути доступний для експертного редагування, але не повинен бути основним режимом взаємодії.

Отже, когнітивне обмеження роботи з LLM-сценаріями полягає не в тому, що користувач не здатний аналізувати складні моделі, а в тому, що традиційні текстові інтерфейси змушують його виконувати зайві операції перетворення, пошуку й верифікації. Когнітивно-адаптивний інтерфейс має зменшити зовнішнє навантаження, переносючи частину перевірки структури на рівень UI: візуалізувати просторові відношення, приховувати другорядні параметри до моменту запиту, підсвічувати потенційні аномалії та підтримувати поетапне занурення в деталі. Саме ця логіка створює підґрунтя для переходу до human-in-the-loop архітектури, у якій користувач не перевіряє весь згенерований масив вручну, а взаємодіє з ним через керовані, візуально зрозумілі й когнітивно структуровані точки контролю.

2 Human-in-the-Loop як принцип контролю генерації

Обмеження, описані у попередньому підрозділі, безпосередньо вказують на необхідність зміни моделі взаємодії користувача з генеративною системою. Якщо LLM-сценарій подається як готовий результат, сформований у відповідь на один промпт, користувач фактично працює з «чорною скринькою»: він бачить вхідний запит і фінальний текст або набір даних, але не має доступу до проміжної логіки формування просторових, параметричних і балансних рішень. Для простих текстових завдань така модель може бути прийнятною, однак для інтерактивного моделювання сценаріїв вона створює критичну проблему контролю. Користувач не лише не бачить, як саме модель розподілила об'єкти, правила й обмеження, а й не може втрутитися у процес до моменту появи помилки.

Альтернативою є перехід від моделі «чорної скриньки» до моделі «скляної скриньки», у якій інтерфейс розкриває користувачу не внутрішні параметри нейромережі як такі, а структурну логіку згенерованого сценарію: які сутності створені, де вони розміщені, які правила до них застосовано, які обмеження порушено і які елементи потребують перевірки. У підході human-centered artificial intelligence підкреслюється, що ефективні ШІ-системи мають поєднувати високі можливості автоматизації з високим рівнем людського контролю [7]. Отже, прозорість у цьому випадку означає не повне пояснення роботи LLM, а створення інтерфейсних умов, за яких користувач може контролювати результат генерації на рівні сценарних структур.

У такій архітектурі ШІ доцільно розглядати не як автономного автора сценарію, а як керований генеративний інструмент або партнера у змішаній

ініціативі. Дослідження mixed-initiative co-creativity у сфері ігрового дизайну показують, що продуктивна взаємодія людини й алгоритму виникає тоді, коли обидві сторони беруть участь у створенні рішення, але людина зберігає можливість спрямовувати, обмежувати й оцінювати машинну генерацію [12]. Для LLM-сценаріїв це означає, що модель може пропонувати варіанти ландшафту, складу сил, тригерів або параметрів юнітів, але остаточна валідація, фіксація та корекція мають залишатися за користувачем.

Для формалізації такого розподілу доцільно звернутися до класичних моделей рівнів автоматизації. Шкала Sheridan-Verplank описує автоматизацію як континуум від повністю ручного керування до повністю автономного виконання дій системою [13]. Подальша модель Parasuraman, Sheridan і Wickens уточнює, що автоматизація може застосовуватися до різних стадій діяльності: збору інформації, аналізу, вибору рішення та виконання дії [14]. Це важливо для ШІ-інтерфейсів, оскільки проблема полягає не в самому факті автоматизації, а в тому, на якому етапі вона забирає контроль у користувача.

Класичний Chat UI у роботі з LLM фактично піднімає автоматизацію до високого рівня одразу на кількох стадіях. Модель не лише аналізує запит, а й самостійно обирає структуру сценарію, генерує фінальний набір об'єктів і подає результат як неподільний масив. Користувач отримує лише постфактум-можливість оцінити відповідь. Для сценарного моделювання це створює деструктивну модель бінарного вибору: «прийняти весь сценарій» або «відхилити/регенерувати весь сценарій». Такий підхід суперечить самій природі складних інтерактивних систем, де частина елементів може бути коректною, частина - потребувати уточнення, а частина - містити критичні помилки.

Наприклад, LLM може згенерувати загалом прийнятну карту, логічну структуру місії та збалансований склад сторін, але помилково розмістити один тип техніки у зоні, де за правилами він не може діяти. У чат-інтерфейсі користувач змушений описувати цю локальну помилку текстом: вказувати координати, тип об'єкта, характер порушення і бажану зміну. Однак новий промпт може змінити не лише проблемний фрагмент, а й сусідні ділянки, параметри інших юнітів або навіть загальну логіку сценарію. У результаті виправлення одного елемента запускає каскадну регенерацію, після якої користувач має повторно перевіряти вже узгоджені частини системи.

Саме тому для когнітивно-адаптивного інтерфейсу принциповим є перенесення автоматизації з рівня повного авторства на рівень підтримки локальних рішень. LLM може виконувати високорівневу генерацію, пропонувати варіанти, аналізувати обмеження й виявляти потенційні суперечності, але інтерфейс має забезпечувати користувачу можливість мікротручання. Мікротручання означає локальну дію користувача щодо конкретного елемента або області сценарію: зафіксувати юніт, заблокувати шар карти, змінити параметр, виділити проблемну зону, запросити альтернативу лише для одного фрагмента або підтвердити запропоновану корекцію.

Такий підхід відповідає принципам human-AI interaction, згідно з якими система має давати користувачу можливість контролювати результат, коригувати помилки, розуміти стан системи та отримувати зворотний зв'язок щодо дій ШІ [8]. У сценарному моделюванні це означає, що користувач повинен працювати не з одним фінальним текстом, а з набором керованих структур: картою, шарами, сутностями, правилами, попередженнями та точками локальної корекції. Тоді ШІ перестає бути автономним генератором, який щоразу створює новий сценарій, і стає інструментом ітеративного уточнення вже наявної моделі.

Отже, Human-in-the-Loop у системах LLM-сценарного моделювання слід розуміти не як формальну присутність людини після завершення генерації, а як архітектурний принцип розподілу контролю. Генеративна модель бере на себе швидке створення варіантів і первинний аналіз, тоді як користувач зберігає контроль над прийняттям рішень, фіксацією коректних елементів і локальною корекцією помилок. Саме такий розподіл створює основу для подальшого проєктування семантичного мосту між природномовним описом, структурованою моделлю даних і візуальним інтерфейсом сценарію.

3 Семантичний міст між нарративом ШІ та структурою сценарію

Після визначення когнітивних обмежень і необхідності human-in-the-loop контролю ключовим завданням стає перетворення результату LLM-генерації на форму, придатну для візуальної перевірки та локального редагування. Природномовний опис сценарію є зручним для користувача, але недостатнім для інтерактивної симуляції, оскільки він не гарантує однозначного визначення об'єктів, координат, правил, тригерів і обмежень. Тому між текстом, який генерує або вводить користувач, і візуальним інтерфейсом сценарію має існувати проміжний рівень - семантичний міст.

У межах цього дослідження семантичний міст розглядається як механізм переходу від природномовного нарративу до структурованої моделі сценарію. Його функція полягає не лише у технічному перетворенні тексту на JSON/XML або інший формат даних, а у формалізації змісту: виділенні сутностей, їхніх властивостей, просторових координат, правил взаємодії та сценарних залежностей. Такий підхід узгоджується з принципами онтологічного моделювання, де онтологія визначається як формальна специфікація понять предметної області та зв'язків між ними [15]. Для генеративних систем це означає, що LLM-результат має бути не фінальним текстом для читання, а джерелом структурованих елементів, які можуть бути перевірені, візуалізовані й змінені користувачем.

Перехід від природномовного опису до структурованої моделі можна подати як послідовність трьох рівнів (рис. 1). На першому рівні користувач або LLM формує нарративний опис: наприклад, *«механізована група просувається через лісисту місцевість, де противник підготував засідку»*. На другому рівні система виділяє з цього опису формалізовані сутності: тип місцевості, сторони конфлікту, юніти, тактичні ролі, умови видимості, можливі тригери й

обмеження. На третьому рівні ці сутності перетворюються на елементи інтерфейсу: ділянки карти, маркери юнітів, зони контролю, правила взаємодії та параметри сценарію. Дослідження формалізації текстових промптів до систем штучного інтелекту також підкреслюють важливість переходу від неструктурованого запиту до формалізованих параметрів, придатних для подальшої машинної обробки [4].

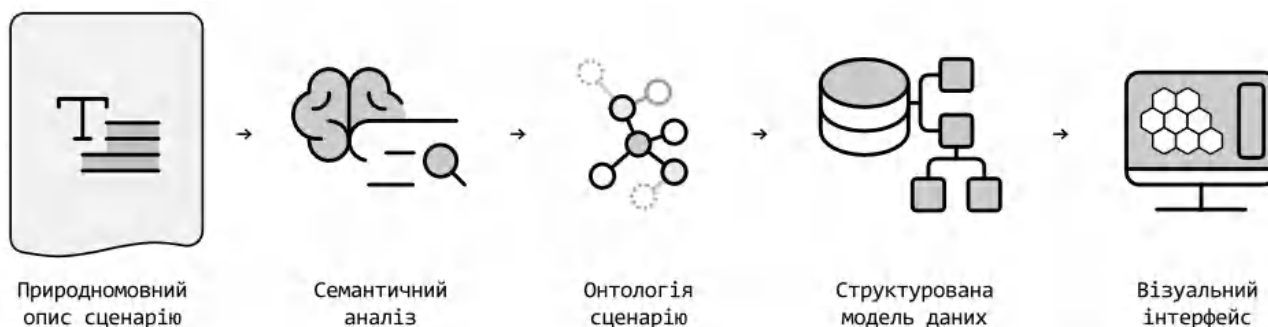


Рисунок 1 – Модель семантичного мосту між природномовним описом і візуальною структурою сценарію

Основою такого переходу є базова онтологія сценарію. Вона задає набір класів сутностей, які можуть бути присутні у сценарії, їхні властивості та допустимі відношення. У випадку варгеймів, мінімальна онтологія має містити щонайменше шість груп: ландшафт, юніти, правила, тригери, цілі та обмеження. Ландшафт визначає типи місцевості й умови просторового переміщення. Юніти описують активні об'єкти сценарію: сторони, типи сил, бойові характеристики, статуси та доступні дії. Правила фіксують допустимі взаємодії між об'єктами. Тригери задають події, які запускаються за певних умов. Цілі визначають бажані стани сценарію для кожної сторони. Обмеження встановлюють межі допустимих змін, наприклад заборону розміщення певного типу техніки на непрохідній місцевості (табл. 2).

Таблиця 2 – Базові компоненти онтології сценарію для інтерактивного моделювання

Компонент онтології	Приклад сутностей	Функція у сценарії
Ландшафт	ліс, дорога, міст, висота, річка	Визначає умови руху, видимості, укриття та доступності ділянок
Юніти	піхота, бронетехніка, артилерія	Формують активні об'єкти сценарію з параметрами й діями
Правила	дальність ураження, штраф руху, зона контролю	Обмежують і регулюють взаємодію між об'єктами
Тригери	вхід у сектор, втрата юніта, досягнення цілі	Запускають події або зміну стану сценарію
Цілі	утримати позицію, прорвати оборону, евакуйовати групу	Визначають логіку оцінювання успішності сценарію
Обмеження	заборона руху, ліміт ресурсів, баланс сторін	Запобігають структурним і балансним помилкам

Наступним етапом є просторове співставлення. Структурована модель сценарію має бути перенесена на гексагональну або іншу тактичну сітку, оскільки саме просторове розміщення визначає значну частину логіки симуляції. Якщо LLM генерує сутність *«танковий підрозділ на північному фланзі»*, інтерфейс має перетворити цей опис на конкретний об'єкт із координатами, зоною дії, допустимими маршрутами й обмеженнями місцевості. У цьому процесі природномовні відношення *«поруч»*, *«позаду»*, *«на фланзі»*, *«у зоні видимості»* мають бути переведені у формальні просторові відношення: координати, відстані, сусідство клітин, сектори огляду або радіуси дії.

Саме на цьому рівні виникає потреба у поділі даних на шари. Замість єдиного неподільного масиву сценарій має бути представлений як сукупність взаємопов'язаних, але окремо контрольованих шарів. Terrain layer містить інформацію про місцевість і її властивості. Entity layer відповідає за розміщення юнітів, об'єктів і ресурсів. Rule layer зберігає правила, які визначають допустимі дії та взаємодії. Event/trigger layer описує події, що активуються за певних умов.

Такий поділ дозволяє користувачу працювати не з усім сценарієм одночасно, а з тим рівнем структури, який потребує перевірки або редагування.

Практична цінність шарової моделі полягає у тому, що вона створює умови для локального контролю. Якщо помилка стосується ландшафту, користувач може редагувати terrain layer без зміни складу сил. Якщо проблема полягає у неправильному розміщенні юніта, корекція відбувається в entity layer. Якщо порушено логіку активації події, змінюється event/trigger layer. Отже, семантичний міст не лише структурує дані, а й готує їх до подальшого застосування вузлів фіксації, локальної корекції та контрольованої регенерації.

У цій логіці інтерфейс виконує роль семантичного перекладача між LLM і користувачем. Для LLM сценарій є набором текстових і структурних залежностей, тоді як для користувача він має бути представленим як зрозумілий простір дій: карта, об'єкти, попередження, правила та можливі точки втручання. Інтерфейс повинен приховувати технічну складність моделі даних, але не приховувати змістові зв'язки, які впливають на коректність сценарію. Тому користувач має бачити не сирий результат генерації, а інтерпретовану структуру, де кожен елемент має візуальне представлення, семантичне значення і зв'язок із правилами сценарію.

Таким чином, семантичний міст є центральним елементом когнітивно-адаптивного інтерфейсу. Він забезпечує перехід від природномовної генерації до керованої інтерактивної моделі, у якій LLM створює початковий матеріал, а UI перетворює його на структуру, доступну для аналізу, перевірки й локального редагування. Без такого проміжного рівня користувач залишається залежним від текстового результату моделі; з ним же сценарій стає системою взаємопов'язаних шарів, сутностей і правил, над якими можна здійснювати точковий human-in-the-loop контроль.

4 Архітектура когнітивно-адаптивного інтерфейсу

Архітектура когнітивно-адаптивного інтерфейсу має будуватися не як розширення чат-вікна, а як окреме середовище керування згенерованим сценарієм. Його основна функція полягає у перетворенні результатів LLM-генерації на структуру, яку користувач може візуально перевіряти, локально редагувати й частково фіксувати. Такий підхід узгоджується з принципами *human-AI interaction*, згідно з якими система має підтримувати видимість стану, можливість корекції, зрозумілий зворотний зв'язок і контроль користувача над результатами автоматизованих дій [8]. У межах сценарного моделювання це означає, що інтерфейс має показувати не лише фінальний текст сценарію, а й структуру його просторових, семантичних і правилкових залежностей.

Центральним елементом такої архітектури є візуальна карта сценарію. Вона виконує роль основного простору контролю, у якому користувач бачить розміщення юнітів, типи місцевості, зони дії, маршрути, конфлікти правил і потенційні аномалії. Для варгеймів природним форматом є гексагональна сітка, оскільки вона дозволяє формалізувати сусідство клітин, відстані, напрямки руху та зони контролю. Проте запропонований принцип не обмежується лише гексагональними картами: він може бути застосований до квадратних сіток, графових карт, часових сценарних діаграм або інших тактичних представлень. Важливим є те, що карта стає не ілюстрацією до тексту, а головним інтерфейсним шаром, через який користувач здійснює контроль над згенерованою моделлю.

Поряд із картою має функціонувати панель семантичного контексту. Її завдання полягає у поясненні того, що саме означає вибраний елемент сценарію: до якої сторони він належить, які параметри має, які правила на нього впливають, які обмеження з ним пов'язані та які фрагменти вихідного промпту або LLM-відповіді стали підставою для його створення. Така панель забезпечує зв'язок між візуальним об'єктом і його семантичним походженням. У контексті візуальної аналітики це відповідає підходу семантичної взаємодії, за якого користувач взаємодіє з візуальним представленням даних, а система перетворює ці дії на сигнали для аналітичної моделі (рис. 2, табл. 3) [16].

Щоб уникнути перевантаження користувача, архітектура має використовувати *progressive disclosure* параметрів. На базовому рівні карта показує лише ключові візуальні дескриптори: тип юніта, сторону, стан, тип місцевості та основні попередження. При фокусуванні або виборі об'єкта відкриваються контекстні атрибути: бойові параметри, модифікатори місцевості, обмеження руху, пов'язані тригери й локальні ризики балансу. Повний технічний опис, зокрема JSON/XML-представлення, історія генерації або службові параметри моделі, має бути доступний лише у спеціальному режимі експертного редагування. Такий поділ дозволяє користувачу зберігати загальне розуміння сценарію, не занурюючись у всі параметри одночасно.

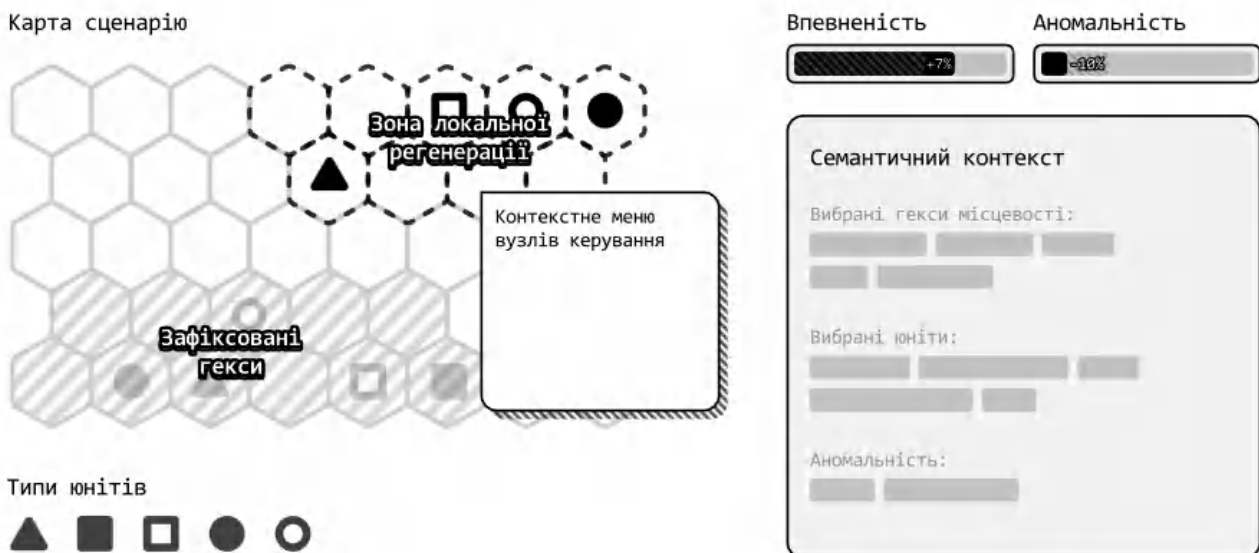


Рисунок 2 – Архітектура когнітивно-адаптивного інтерфейсу для контролю LLM-сценарію

Таблиця 3 – Ключові компоненти когнітивно-адаптивного інтерфейсу

Компонент	Функція	Очікуваний ефект
Візуальна карта	Просторове представлення сценарію, юнітів, зон і маршрутів	Зменшення потреби у ручній реконструкції сценарію з тексту
Панель семантичного контексту	Пояснення параметрів, правил і походження вибраного елемента	Підвищення прозорості LLM-результату
Поступове розкриття інформації	Поступове відкриття параметрів залежно від дії користувача	Зниження інформаційного перевантаження
Індикатори надійності	Позначення елементів із різним рівнем надійності	Пріоритезація перевірки
Теплові карти аномалій	Виявлення зон ризику, концентрації або конфлікту	Швидке виявлення проблемних ділянок
Контрольні вузли (control nodes)	Фіксація коректних елементів сценарію	Запобігання каскадній регенерації
Семантичне відновлення (semantic inpainting)	Локальна регенерація вибраного фрагмента	Корекція без руйнування всього сценарію

Окремим компонентом є індикатори впевненості. Вони мають показувати, наскільки система «впевнена» у коректності певного елемента або рішення. Наприклад, низький рівень впевненості може бути присвоєний юніту, розміщення якого суперечить частині правил, або тригеру, який має нечітку умову активації. Візуалізація невизначеності є важливою для складних систем прийняття рішень, оскільки допомагає користувачу розрізняти стабільні дані та елементи, що потребують додаткової перевірки [17]. У LLM-сценаріях такі індикатори не повинні подаватися як абсолютна математична істина; їхня роль полягає у пріоритезації уваги користувача.

Для виявлення просторових проблем доцільно застосовувати теплові карти аномалій. Вони можуть показувати зони надмірної концентрації юнітів, ділянки з підвищеним ризиком дисбалансу, конфлікти між типом місцевості й розміщеними об'єктами, а також сектори, де правила сценарію застосовуються неоднозначно. Наприклад, якщо в одному секторі карта містить надто багато одиниць однієї сторони або LLM розмістила артилерію у зоні, де вона не має лінії вогню, інтерфейс має не приховувати цю проблему в тексті, а візуально маркувати її на карті. Такий підхід знижує зовнішнє когнітивне навантаження, оскільки користувач бачить проблемну область без потреби вручну шукати її у структурі даних.

Поряд із тепловими картами мають використовуватися механізми підсвічування конфліктів правил. Якщо певний об'єкт порушує обмеження руху, несумісний із типом місцевості або активує тригер у неправильний момент, інтерфейс має явно позначити цей конфлікт. Важливо, щоб попередження було пов'язане не лише з об'єктом, а й із правилом, яке порушено. Наприклад, користувач має бачити не загальне повідомлення «помилка сценарію», а конкретне пояснення: *«бронетехніка розміщена на непрохідній ділянці»* або *«тригер евакуації активується до досягнення цільової зони»*. Це робить верифікацію сценарію змістовною, а не формальною.

Додаткову роль виконують локальні підказки щодо ризиків балансу. Вони мають попереджати користувача про потенційні наслідки зміни ще до запуску регенерації. Наприклад, якщо користувач додає новий підрозділ у сектор, система може показати, що це змінює співвідношення сил у зоні, збільшує щільність оборони або робить одну з цілей надто легкою для досягнення. Такі підказки не повинні автоматично забороняти дію, оскільки остаточне рішення залишається за користувачем, але вони мають надавати інформацію для усвідомленого втручання.

Найважливішим архітектурним елементом є контрольні вузли. Вони позначають елементи сценарію, які користувач визнав коректними й не хоче змінювати під час наступних ітерацій генерації. Такими вузлами можуть бути окремі гекси, групи клітин, юніти, параметри, правила, тригери або цілі сценарію. Контрольні вузли перетворюють вибраний елемент на обмеження для наступного запиту до LLM: модель має враховувати його як незмінну частину контексту. Це дозволяє уникнути ситуації, коли виправлення одного локального елемента випадково змінює вже перевірені частини сценарію.

Механічно це реалізується через freezing або pinning. Freezing означає тимчасове блокування шару, області або параметра від змін. Pinning означає явне закріплення елемента як важливого для сценарної логіки. Наприклад, користувач може зафіксувати terrain layer, щоб LLM змінювала лише розташування юнітів; закріпити конкретний підрозділ, щоб він залишався у вибраному секторі; або заблокувати параметр дальності дії, якщо він уже узгоджений із правилами. Усі ці дії мають бути видимими в інтерфейсі, щоб користувач розумів, які частини сценарію відкриті для регенерації, а які захищені від змін.

Локальна регенерація реалізується через принцип семантичного відновлення. За аналогією з редагуванням зображень, де змінюється лише вибрана область, у сценарній системі змінюється лише визначений фрагмент семантичної структури. Користувач виділяє проблемну область на карті або обирає конкретний об'єкт, після чого формулює короткий мікропромпт: наприклад, «замінити цей підрозділ на легшу піхоту», «зменшити щільність сил у секторі» або «зробити тригер активації пізнішим». Система передає LLM не весь сценарій як відкритий простір для регенерації, а локальний контекст: вибрану область, сусідні незмінні елементи, зафіксовані вузли та правила, які не можна порушувати.

У результаті когнітивно-адаптивний інтерфейс працює як середовище керованого редагування, а не як пасивний переглядач відповіді ШІ. Його архітектура поєднує візуальну карту, семантичний контекст, індикатори невизначеності, маркування аномалій, вузли фіксації та локальну регенерацію. Саме така комбінація дозволяє перейти від глобальної регенерації сценарію до ітеративного уточнення окремих фрагментів. Це зберігає переваги LLM як швидкого генеративного інструмента, але повертає користувачу контроль над структурною логікою, балансом і просторовою коректністю інтерактивної симуляції.

5 Механізм локальної корекції сценарію

Механізм локальної корекції є практичним продовженням описаної архітектури когнітивно-адаптивного інтерфейсу. Його головна функція полягає у тому, щоб замінити глобальну регенерацію сценарію керованим циклом часткового редагування. У класичному Chat UI користувач змушений формулювати текстове уточнення до всієї відповіді моделі, навіть якщо помилка стосується одного юніта, одного сектору карти або одного правила. У когнітивно-адаптивному інтерфейсі корекція має бути прив'язана до конкретної області, конкретного шару або конкретної сутності сценарію. На рис. 3 схематично показано етапи роботи із запропонованим інтерфейсом.

Першим етапом такого циклу є генерація початкового сценарію. LLM отримує природномовний опис ситуації, наприклад склад сторін, тип місцевості, цілі, обмеження та бажану динаміку подій. На цьому етапі модель формує первинну структуру сценарію: опис карти, перелік юнітів, правила взаємодії, тригери, умови перемоги та інші параметри. Однак цей результат не повинен одразу розглядатися як фінальний. Він є початковою гіпотезою системи, яка потребує інтерфейсної інтерпретації, візуалізації та перевірки.

Другий етап полягає у перетворенні згенерованого сценарію на візуальну структуру. Інтерфейс розкладає результат LLM на окремі шари: місцевість, сутності, правила, тригери та обмеження. Після цього ці дані відображаються у вигляді карти, панелі семантичного контексту, списку подій і параметрів. Саме на цьому етапі користувач перестає працювати з лінійним текстом і отримує

доступ до просторової моделі сценарію. Це зменшує потребу у ручній реконструкції зв'язків між описом, координатами, об'єктами та правилами.

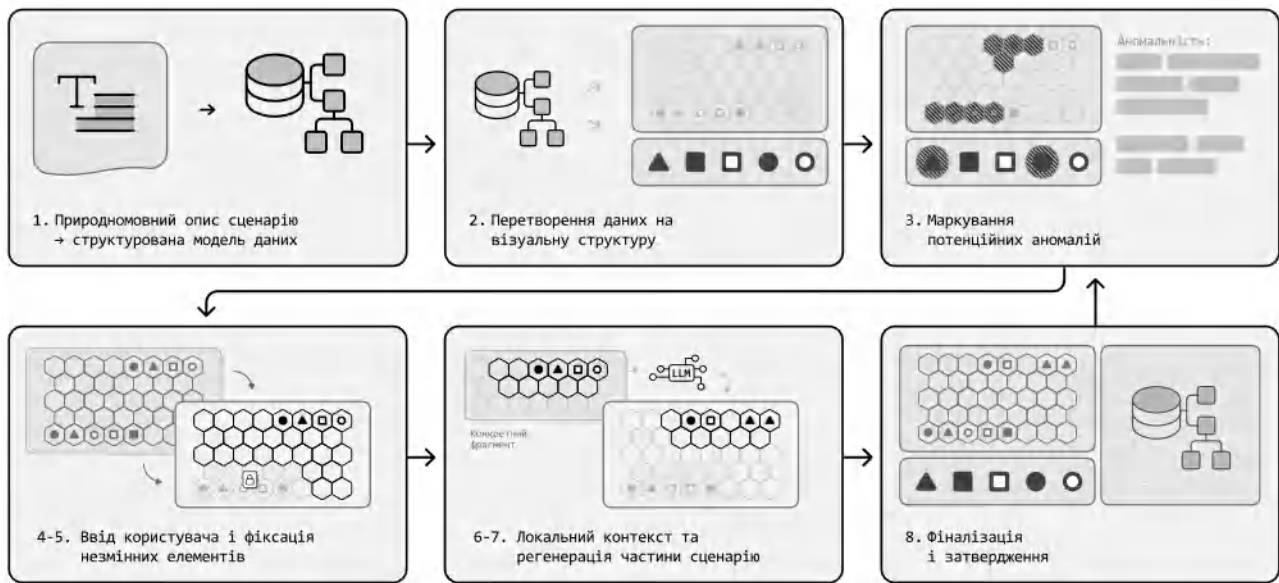


Рисунок 3 – Цикл локальної корекції LLM-сценарію в когнітивно-адаптивному інтерфейсі

Третім етапом є автоматичне маркування потенційних аномалій. Система перевіряє згенеровану структуру за набором правил і евристик: чи відповідає тип юніта типу місцевості, чи не перевищена щільність сил у секторі, чи не порушені умови видимості, чи не активується тригер передчасно, чи не створює розташування сторін очевидного дисбалансу. Результатом такої перевірки є візуальні позначки на карті, індикатори впевненості або попередження у панелі контексту. Важливо, що система не обов'язково має автоматично виправляти всі проблеми; її завдання – зробити їх видимими для користувача.

Четвертий етап передбачає дію користувача: він виділяє проблемну область або конкретний елемент сценарію. Це може бути один гекс, група клітин, юніт, зона контролю, тригер або правило. Виділення області є принципово важливим, оскільки саме воно задає межі корекції. На відміну від текстового промпту, де користувач змушений словесно описувати координати й контекст, візуальне виділення дозволяє безпосередньо вказати, яка частина сценарію має бути змінена.

П'ятий етап – фіксація незмінних елементів. Перед запуском локальної регенерації UI визначає, які частини сценарію мають залишитися стабільними. Це можуть бути сусідні гекси, зафіксовані юніти, правила руху, балансні обмеження або вже перевірені тригери. Такі елементи передаються у запит до LLM як обмеження, а не як відкриті для редагування дані. Завдяки цьому система запобігає каскадній зміні сценарію, коли виправлення одного локального фрагмента випадково змінює інші коректні частини моделі.

На шостому етапі LLM отримує локальний контекст. На відміну від глобального запиту, локальний контекст містить лише ті дані, які потрібні для конкретної корекції: вибрану область, її поточний стан, сусідні незмінні елементи, релевантні правила та коротку інструкцію користувача. Наприклад,

замість промпту *«перероби розміщення сил на карті»* система формує запит типу: *«у зоні X змінити склад підрозділів так, щоб бронетехніка не перебувала на непрохідній місцевості; сусідні гекси, цілі сценарію та баланс сторін залишити незмінними»*. Така структура запиту зменшує простір невизначеності для моделі.

Сьомий етап полягає у генерації тільки обмеженої частини сценарію. LLM не створює сценарій заново, а пропонує зміну для вибраного фрагмента. Це може бути заміна типу юніта, перенесення об'єкта на суміжну клітину, зміна параметра, уточнення тригера або створення альтернативного локального розміщення. Після цього інтерфейс має порівняти новий фрагмент із зафіксованими елементами й перевірити, чи не виникли нові конфлікти. Якщо корекція не відповідає обмеженням, вона не повинна автоматично вбудовуватися у сценарій.

Восьмий етап – перевірка та інтеграція результату у загальний стан. Користувач переглядає запропоновану зміну у візуальному середовищі, оцінює її вплив на баланс, правила й просторову логіку, після чого приймає, відхиляє або додатково уточнює результат. Прийнята зміна вбудовується у загальну модель сценарію як новий стан, тоді як попередній стан має зберігатися для можливості скасування або порівняння. Таким чином, кожна локальна корекція стає контрольованою ітерацією, а не непередбачуваною регенерацією всього сценарію.

Отже, механізм локальної корекції реалізує human-in-the-loop підхід на рівні конкретної дії користувача. Він поєднує генеративні можливості LLM із візуальним вибором області, фіксацією незмінних елементів, локальним контекстом і перевіркою результату перед інтеграцією. Такий цикл знижує когнітивне навантаження, зменшує ризик каскадної регенерації та дозволяє підтримувати структурну цілісність сценарію протягом кількох ітерацій редагування.

Результати дослідження

1 Порівняння Chat UI та когнітивно-адаптивного інтерфейсу

Порівняння класичного Chat UI та когнітивно-адаптивного інтерфейсу доцільно здійснювати не за зручністю введення промпту, а за здатністю підтримувати контроль над складною сценарною структурою. Для простих генеративних завдань чат-інтерфейс є достатнім, оскільки результат може бути перевірений шляхом послідовного читання. Проте у системах інтерактивного моделювання сценарій складається з кількох взаємопов'язаних рівнів: просторової карти, юнітів, параметрів, правил, тригерів, цілей і балансних обмежень. Тому ключовим критерієм стає не швидкість генерації першої відповіді, а керованість подальшої перевірки й редагування. У таблиці 4 наведено порівняння Chat UI та когнітивно-адаптивного інтерфейсу в задачах LLM-сценарного моделювання.

Наведене порівняння показує, що Chat UI є ефективним переважно на етапі формування початкового запиту або загального опису сценарію. Його слабкість проявляється на етапах перевірки, уточнення та часткового редагування. Користувач змушений працювати з лінійною текстовою відповіддю, тоді як сама структура сценарію є нелінійною і просторово розподіленою. Через це зростає ризик пропустити приховану помилку або спровокувати небажану зміну вже узгоджених фрагментів.

Таблиця 4 – Порівняння Chat UI та когнітивно-адаптивного інтерфейсу в задачах LLM-сценарного моделювання

Критерій	Chat UI	Когнітивно-адаптивний інтерфейс
Рівень контролю	Контроль здійснюється переважно через текстові уточнення після генерації. Користувач впливає на результат опосередковано.	Контроль здійснюється через карту, шари, вузли фіксації, локальні обмеження та візуальні точки втручання.
Локальність редагування	Локальна зміна описується текстом, але модель може змінити інші частини сценарію.	Користувач виділяє конкретну область, шар або об'єкт, а корекція обмежується заданим контекстом.
Ризик каскадної регенерації	Високий: виправлення одного фрагмента може спричинити зміну вже коректних елементів.	Низький: зафіксовані елементи й контрольні вузли обмежують простір регенерації.
Когнітивне навантаження	Високе: користувач має самостійно зіставляти текст, координати, правила й параметри.	Нижче: інтерфейс візуалізує просторові відношення, аномалії та релевантні параметри.
Прозорість логіки	Обмежена: результат подається як суцільна відповідь без явного розділення на шари й залежності.	Вища: сценарій подається як структура з ландшафтом, юнітами, правилами, тригерами й обмеженнями.
Підтримка балансу	Баланс перевіряється вручну або через повторні промпти, що не гарантує стабільності результату.	Баланс підтримується через попередження, індикатори ризику, теплові карти та локальні обмеження.
Придатність для складних сценаріїв	Обмежена: ефективність знижується зі зростанням кількості об'єктів, правил і залежностей.	Вища: інтерфейс підтримує багаторівневу структуру, поступове розкриття інформації та локальні ітерації.

Когнітивно-адаптивний інтерфейс, навпаки, переносить основну взаємодію з рівня текстового уточнення на рівень структурного керування. Його перевага полягає не у відмові від природної мови, а у поєднанні промптингу з візуальною картою, семантичними шарами, маркуванням аномалій і локальною регенерацією. У такій моделі природна мова використовується для формулювання наміру, а інтерфейс визначає межі, контекст і обмеження зміни.

Отже, у задачах інтерактивного моделювання сценаріїв когнітивно-адаптивний інтерфейс має вищу придатність, оскільки краще відповідає природі самого об'єкта редагування. Складний сценарій потребує не лише генерації, а й постійної верифікації, фіксації коректних частин і контрольованого внесення змін. Саме ці функції залишаються слабким місцем Chat UI і становлять основну перевагу запропонованого підходу.

2 Аналітична модель часових витрат

Для аналітичного порівняння двох моделей взаємодії доцільно використати скорочену Keystroke-Level Model (KLM). У класичному вигляді KLM застосовується для прогнозування часу виконання користувацьких дій в інтерактивних системах через сумування окремих операторів: введення, вказування, ментальної підготовки, перемикання режимів та очікування реакції системи. У межах цього дослідження модель використовується не для точного емпіричного вимірювання, а для аналітичного порівняння двох сценаріїв редагування LLM-сценарію.

Скорочену модель часових витрат можна подати так:

$$T_{\text{execute}} = T_K + T_P + T_H + T_M + T_R, \quad (1)$$

де T_K – час на введення тексту або параметрів;
 T_P – час на вказування, вибір області або об'єкта;
 T_H – час на перемикання між режимами взаємодії;
 T_M – час на когнітивну оцінку результату;
 T_R – час очікування відповіді системи.

Для LLM-сценарного моделювання особливо важливими є T_M і T_R , оскільки користувач витрачає значний час на перевірку згенерованої структури, а система – на повторну генерацію тексту або фрагментів даних.

Розглянемо типову задачу (табл. 5): у згенерованому сценарії виявлено помилку, коли бронетехніка розміщена на ділянці, що за правилами є непрохідною.

У сценарії А користувач працює через класичний Chat UI. Він має знайти помилку в тексті або структурі даних, сформулювати уточнювальний промпт, описати координати, характер помилки й бажану зміну. Після цього LLM генерує нову відповідь, яка може змінити не лише проблемну ділянку, а й інші елементи сценарію. Отже, після отримання результату користувач змушений повторно перевіряти значну частину карти, правил і параметрів.

У сценарії Б користувач працює через когнітивно-адаптивний інтерфейс. Помилка маркується на карті як конфлікт між типом юніта і типом місцевості. Користувач виділяє проблемний гекс або групу гексів, фіксує сусідні незмінні елементи та формулює коротку локальну інструкцію. LLM отримує не весь сценарій як відкритий простір для регенерації, а обмежений контекст: вибрану

область, правила, зафіксовані елементи й необхідну зміну. У результаті генерується лише локальний фрагмент, який потім перевіряється й інтегрується у загальний стан.

Таблиця 5 – Порівняння часових витрат у двох сценаріях редагування

Оператор	Сценарій А: Chat UI	Сценарій Б: когнітивно-адаптивний інтерфейс
T_K	Високий: потрібно описати проблему, координати, обмеження й бажану зміну текстом	Нижчий: вводиться короткий мікропромпт до вже виділеної області
T_P	Низький або відсутній, оскільки взаємодія переважно текстова	Вищий: користувач виділяє область або об'єкт на карті
T_H	Середній: перемикання між читанням відповіді, промптом і перевіркою структури	Середній або нижчий: основна взаємодія зосереджена у візуальному середовищі
T_M	Високий: потрібно самостійно знайти помилку й повторно перевірити наслідки регенерації	Нижчий: помилка візуально маркована, а зона зміни обмежена
T_R	Високий: можлива регенерація значної частини сценарію	Нижчий: генерується лише локальний фрагмент

З таблиці 5 видно, що когнітивно-адаптивний інтерфейс може збільшувати T_P , оскільки користувач виконує додаткову дію вибору області на карті. Проте це збільшення є функціонально виправданим, оскільки воно зменшує два найвагомші джерела витрат – T_M і T_R . Візуальне маркування аномалії скорочує час когнітивного пошуку та оцінки, а локальний контекст зменшує обсяг генерації й подальшої перевірки.

Отже, аналітична модель показує, що перевага когнітивно-адаптивного інтерфейсу полягає не в усуненні всіх операцій користувача, а в перерозподілі часових витрат. Частина текстового введення і повторної ментальної перевірки замінюється точним візуальним вибором області та контрольованою локальною регенерацією. Це робить процес редагування сценарію більш передбачуваним, зменшує ризик каскадних змін і підвищує ефективність роботи зі складними LLM-сценаріями.

3 Узагальнені результати концептуальної моделі

Проведений аналіз дозволяє сформулювати узагальнені результати запропонованої концептуальної моделі. Насамперед, у межах дослідження обґрунтовано необхідність розглядати інтерфейс для LLM-сценарного моделювання не як допоміжний засіб введення промптів, а як повноцінну архітектуру контролю генерації. Запропонована модель когнітивно-адаптивного інтерфейсу поєднує візуальну карту, семантичний контекст, progressive disclosure параметрів, індикатори невизначеності, маркування аномалій, вузли фіксації та локальну регенерацію. У сукупності ці елементи створюють

середовище, у якому користувач може не лише отримувати результат від ШІ, а й керувати його перевіркою, уточненням і частковим редагуванням.

Другим результатом є обґрунтування переходу від класичного Chat UI до human-in-the-loop взаємодії. Показано, що чат-інтерфейс є придатним для формування початкового опису сценарію, але недостатнім для контролю складної просторово-нарративної структури. Його основне обмеження полягає в тому, що користувач отримує фінальний масив даних і може впливати на нього переважно через нові текстові запити. На відміну від цього, HITL-підхід передбачає постійну участь користувача у валідації, виборі, фіксації та корекції елементів сценарію.

Третім результатом є визначення ролі семантичного мапінгу між природномовним текстом і просторовою структурою сценарію. У запропонованій моделі LLM-результат не використовується безпосередньо як фінальний сценарій, а проходить через проміжний шар формалізації. На цьому рівні нарративний опис перетворюється на систему сутностей: ландшафт, юніти, правила, тригери, цілі та обмеження. Далі ці сутності розподіляються за візуальними шарами інтерфейсу, що дозволяє користувачу працювати не з абстрактним текстом, а з керованою моделлю сценарію.

Четвертим результатом є опис механізму контрольних вузлів, як засобу запобігання каскадній регенерації. Вузли фіксації дозволяють позначати вже перевірені елементи сценарію як незмінні для наступних ітерацій. Завдяки цьому локальна корекція одного фрагмента не повинна призводити до зміни сусідніх, уже узгоджених частин моделі. Такий механізм є принциповим для складних симуляцій, де навіть незначна зміна параметра може вплинути на баланс, просторову логіку або сценарну послідовність.

П'ятим результатом є аналітичне обґрунтування потенційного зниження когнітивних і часових витрат при локальному редагуванні. Скорочена KLM-модель показує, що когнітивно-адаптивний інтерфейс не усуває всі дії користувача, але перерозподіляє їх у більш продуктивний спосіб. Замість довгого текстового уточнення, повної регенерації та повторної перевірки сценарію користувач виконує точний вибір області, фіксує незмінні елементи й запускає локальну регенерацію. Це зменшує передусім витрати на когнітивну оцінку результату та очікування відповіді системи.

Отже, запропонована концептуальна модель демонструє, що ефективність ШІ у сценарному моделюванні залежить не лише від якості генеративної моделі, а й від архітектури взаємодії з нею. Когнітивно-адаптивний інтерфейс забезпечує перехід від одноразової генерації тексту до ітеративного, візуально контрольованого процесу створення сценарію, у якому користувач зберігає контроль над логікою, балансом і структурною цілісністю інтерактивної системи.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що використання великих мовних моделей у системах інтерактивного моделювання сценаріїв відкриває значні можливості для прискорення створення медіаконтенту, але водночас формує нову проблему керованості. LLM здатні швидко генерувати нарративні описи, варіанти структури сценарію, параметри об'єктів і загальну логіку подій, однак сам факт генерації не гарантує структурної коректності результату. Для складних просторово-нарративних систем, зокрема варгеймів, критичними залишаються не лише швидкість створення сценарію, а й можливість перевірити баланс, просторову топологію, відповідність правил, коректність тригерів і логіку розміщення сутностей.

Показано, що класичний Chat UI є недостатнім інтерфейсом для роботи з такими сценаріями. Його основне обмеження полягає у лінійному текстовому характері взаємодії, тоді як сам сценарій є багатовимірною структурою. Користувач змушений перевіряти просторові, параметричні та правилкові залежності через текст, таблиці або сирі структури даних, що створює надмірне зовнішнє когнітивне навантаження. Крім того, виправлення локальної помилки через текстовий промпт часто не гарантує локальності зміни: модель може регенерувати не лише проблемний фрагмент, а й інші, вже коректні частини сценарію.

Отже, основною проблемою LLM-сценарного моделювання є не стільки здатність ШІ створювати початковий сценарій, скільки здатність користувача контролювати, верифікувати й уточнювати цей результат. Саме контроль і верифікація визначають придатність генеративної системи для складних інтерактивних медіаструктур. Якщо користувач не має інструментів для виявлення аномалій, фіксації коректних елементів і локальної корекції помилок, то перевага швидкої генерації частково нівелюється витратами на повторну перевірку й ризиком руйнування вже узгодженої структури.

У роботі обґрунтовано доцільність переходу до когнітивно-адаптивного інтерфейсу, який поєднує візуалізацію сценарію, human-in-the-loop контроль, маркування аномалій і механізми локальної корекції. Такий інтерфейс має виконувати роль семантичного мосту між природномовним описом, структурованою моделлю даних і візуальним середовищем редагування. Він не замінює LLM, а задає умови, у яких результати генерації стають видимими, перевірюваними й керованими. Візуальна карта, панель семантичного контексту, progressive disclosure параметрів, індикатори невизначеності, теплові карти аномалій і підсвічування конфліктів правил створюють основу для зниження когнітивного навантаження користувача.

Окреме значення має механізм контрольних вузлів. Він дозволяє позначати перевірені елементи сценарію як незмінні для наступних ітерацій генерації. Завдяки цьому користувач отримує можливість переходити від глобальної регенерації всього сценарію до керованого редагування окремих фрагментів.

Локальна регенерація через семантичне відновлення дає змогу змінювати лише визначену область, шар або сутність, зберігаючи контекст і не руйнуючи вже узгоджені частини моделі. Саме цей перехід є ключовим для практичного застосування LLM у системах інтерактивного моделювання.

Аналітичне порівняння Chat UI та когнітивно-адаптивного інтерфейсу показало, що запропонований підхід має переваги за критеріями керованості, локальності редагування, прозорості логіки, підтримки балансу та придатності для складних сценаріїв. Скорочена KLM-модель засвідчила, що когнітивно-адаптивний інтерфейс може зменшувати насамперед витрати на когнітивну оцінку результату та очікування відповіді системи. Це досягається завдяки тому, що користувач не описує всю проблему текстом і не перевіряє весь сценарій після кожного уточнення, а працює з конкретною областю, конкретними обмеженнями і контрольованою локальною зміною.

Таким чином, запропонована концепція доводить, що ефективність генеративного ШІ у сценарному моделюванні залежить не лише від якості мовної моделі, а й від архітектури інтерфейсу, через який користувач взаємодіє з результатами генерації. Когнітивно-адаптивний інтерфейс дозволяє зберегти переваги LLM як швидкого генеративного інструмента, але водночас повертає користувачу контроль над структурою, балансом і логікою сценарію. Це створює основу для розробки нових редакторів інтерактивного контенту, у яких людина виступає не пасивним отримувачем відповіді ШІ, а активним куратором і верифікатором семантичної моделі.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з емпіричною перевіркою запропонованої концепції. Наступним етапом має стати створення прототипу когнітивно-адаптивного інтерфейсу та його тестування на типових задачах сценарного моделювання. Доцільним є проведення порівняльних експериментів із класичним Chat UI для вимірювання часу редагування, кількості помилок, рівня когнітивного навантаження та стабільності результатів після кількох ітерацій корекції. Окремим напрямом є розробка агентних механізмів балансування сценаріїв, автоматизована перевірка правил, виявлення конфліктів між шарами моделі та інтеграція таких механізмів у human-in-the-loop цикл редагування.

Список літератури.

1. Togelius, J., Yannakakis, G. N., Stanley, K. O., & Browne, C. (2011). Search-based procedural content generation: A taxonomy and survey. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 3(3), 172-186. <https://doi.org/10.1109/TCIAIG.2011.2148116>.
2. Yannakakis, G.N., & Togelius, J. (2011). Experience-driven procedural content generation. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2(3), 147–161. <https://doi.org/10.1109/T-AFFC.2011.6>.
3. Ministry of Defence. (2017). Defence wargaming handbook. <https://www.gov.uk/government/publications/defence-wargaming-handbook>.
4. Oliinyk, V., Biziuk, A., Deineko, Z., & Chelombitko, V. (2025). Formalization of text prompts to artificial intelligence systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5 (2(137)), 84-97. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335473>.

5. Farrokhi Maleki, M., & Zhao, R. (2024). Procedural content generation in games: A survey with insights on emerging LLM integration. *AAAI Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment*, 20(1), 167-178. <https://doi.org/10.1609/aiide.v20i1.31877>.
6. Huang, L., Yu, W., Ma, W., Zhong, W., Feng, Z., Wang, H., Chen, Q., Peng, W., Feng, X., Qin, B., & Liu, T. (2025). A survey on hallucination in large language models: Principles, taxonomy, challenges, and open questions. *ACM Transactions on Information Systems*, 43(2), 1-55. <https://doi.org/10.1145/3703155>.
7. Shneiderman, B. (2020). Human-centered artificial intelligence: Reliable, safe & trustworthy. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 36(6), 495-504. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1741118>.
8. Amershi, S., Weld, D., Vorvoreanu, M., Fournery, A., Nushi, B., Collisson, P., Suh, J., Iqbal, S., Bennett, P. N., Inkpen, K., Teevan, J., Kikin-Gil, R., & Horvitz, E. (2019). Guidelines for human-AI interaction. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. (p. 1-13). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3290605.3300233>.
9. Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4.
10. Sweller, J., van Merriënboer, J. J. G., & Paas, F. G. W. C. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational Psychology Review*, 10(3), 251-296. <https://doi.org/10.1023/A:1022193728205>.
11. Larkin, J.H., & Simon, H.A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11(1), 65-100. <https://doi.org/10.1111/j.1551-6708.1987.tb00863.x>.
12. Yannakakis, G. N., Liapis, A., & Alexopoulos, C. (2014). Mixed-initiative co-creativity. In *Proceedings of the 9th International Conference on the Foundations of Digital Games*. (p. 1-8). <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/29459>.
13. Moray, N., Rodriguez, D., & Clegg, B. (2000). Levels of automation in process control. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(1), 93-96. <https://doi.org/10.1177/154193120004400125>.
14. Parasuraman, R., Sheridan, T.B., & Wickens, C.D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 30(3), 286-297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>.
15. Gruber, T.R. (1995). Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing? *International Journal of Human-Computer Studies*, 43(5-6), 907-928. <https://doi.org/10.1006/ijhc.1995.1081>.
16. Endert, A. (2014). Semantic interaction for visual analytics: Toward coupling cognition and computation. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 34(4), 8-15. <https://doi.org/10.1109/MCG.2014.73>.
17. Bisantz, A. M., Cao, D., Jenkins, M., Pennathur, P. R., Farry, M., Roth, E., Potter, S.S., & Pfautz, J. (2011). Comparing uncertainty visualizations for a dynamic decision-making task. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 5(3), 277-293. <https://doi.org/10.1177/1555343411415793>.

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕКСТОВИХ КОРПУСІВ У ДОСЛІДЖЕННЯХ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДИСТАНЦІЙНІЙ ОСВІТІ

Слісаренко Р.В.

аспірант, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0009-3286-4333

***Анотація.** У розділі розглянуто теоретичні та методичні засади тематичного моделювання текстових корпусів, у яких відображено використання штучного інтелекту в дистанційній освіті. Здійснено порівняльний аналіз класичних і сучасних підходів до виявлення тематичних структур у текстових даних цієї предметної області. Обґрунтовано доцільність використання гібридної методики на основі інформованих пріорів для Latent Dirichlet Allocation та формалізованого фреймворку динамічного контекстуального тематичного моделювання з використанням великих мовних моделей. Показано, що запропонований підхід підвищує змістову релевантність, інтерпретованість і аналітичну придатність результатів аналізу.*

***Ключові слова:** тематичне моделювання, дистанційна освіта, штучний інтелект в освіті, освітні текстові корпуси, latent dirichlet allocation, dynamic contextual topic modeling.*

Вступ

Сучасний етап розвитку дистанційної освіти характеризується активним використанням засобів штучного інтелекту в навчальному процесі, підтримці здобувачів освіти, аналізі освітнього контенту та цифровій організації освітнього середовища. Це зумовлює появу значних масивів текстових даних, у яких фіксуються різні аспекти впровадження, оцінювання та осмислення можливостей штучного інтелекту в дистанційному навчанні. До таких даних належать наукові публікації, аналітичні огляди, описи цифрових платформ, результати опитувань, форуми, відкриті відповіді учасників освітнього процесу та інші текстові джерела, що відображають тенденції розвитку цієї сфери [1, 2].

За таких умов особливої ваги набувають методи аналізу текстових корпусів, здатні виявляти приховані змістові закономірності, стійкі тематичні напрями та проблемні аспекти досліджуваної предметної області. Одним із найбільш перспективних інструментів такого аналізу є тематичне моделювання, яке дозволяє автоматизовано виявляти теми у великих масивах текстів без попереднього ручного маркування [1, 2]. У межах цього дослідження тематичне моделювання розглядається як метод аналізу текстових матеріалів, у яких відображено використання штучного інтелекту в дистанційній освіті, а не як

інструмент безпосереднього впровадження штучного інтелекту в освітню практику.

Разом із тим застосування тематичного моделювання до таких корпусів супроводжується низкою методичних труднощів. Тексти, присвячені використанню штучного інтелекту в дистанційному навчанні, характеризуються термінологічною варіативністю, міждисциплінарністю, різними рівнями формалізації та часовою динамікою змісту. Унаслідок цього класичні підходи, зокрема Latent Dirichlet Allocation (LDA) та Non-negative Matrix Factorization (NMF), не завжди забезпечують достатню чутливість до контексту, стійкість результатів і точність відображення змістових зв'язків у таких текстах [1, 3, 4]. У зв'язку з цим актуальним є не лише порівняльний аналіз наявних методів тематичного моделювання, а й розробка таких методичних рішень, які дозволяють підвищити змістову релевантність, інтерпретованість і контекстуальну чутливість результатів аналізу.

Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є використання гібридної методики на основі інформованих пріорів для LDA та формалізованого фреймворку Dynamic Contextual Topic Modeling with Large Language Models (DCTM-LLM) [5].

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є обґрунтування й розробка методичних засад тематичного моделювання текстових корпусів, у яких відображено використання штучного інтелекту в дистанційній освіті [1, 5].

Для досягнення поставленої мети передбачено проаналізувати класичні та сучасні підходи до тематичного моделювання текстових корпусів і визначити їх придатність для дослідження матеріалів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті [1-4].

Окрему увагу зосереджено на встановленні переваг та обмежень методів LDA, NMF і class-based Term Frequency–Inverse Document Frequency (c-TF-IDF) у контексті аналізу текстів, що відображають напрями, особливості та тенденції застосування штучного інтелекту в дистанційному навчанні [1, 3, 4].

Подальшим завданням є обґрунтування доцільності використання гібридної методики тематичного моделювання на основі інформованих пріорів для LDA з метою підвищення якості аналізу текстів зазначеної предметної області [1, 5].

Водночас важливо подати формалізований фреймворк DCTM-LLM для дослідження тематичної структури корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті [5].

Завершальним завданням є характеристика переваг запропонованого підходу та визначення його аналітичної придатності для виявлення змістових закономірностей у текстових матеріалах досліджуваної тематики [1, 2, 5].

Основна частина

Порівняльний аналіз методів тематичного моделювання в дослідженні наукового дискурсу щодо штучного інтелекту в дистанційній освіті

Тематичне моделювання доцільно розглядати як інструмент виявлення прихованих змістових структур у великих масивах текстових даних, що дозволяє переходити від аналізу окремих документів до узагальненого виявлення тематичних ліній у межах певної предметної області [1, 2]. У контексті цього дослідження особливого значення набувають інтерпретованість результатів, здатність працювати з неоднорідними текстами та можливість виявлення стійких тематичних закономірностей у корпусах, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті [1, 2, 5].

Для дослідження цієї предметної області доцільно зіставити методи, що репрезентують різні підходи до побудови тематичних структур, а саме LDA, NMF і *c*-TF-IDF. LDA належить до класичних імовірнісних моделей і виходить із припущення, що документ може бути представлений як суміш тем, а кожна тема – як розподіл імовірностей слів [1, 2]. NMF репрезентує лінійно-алгебраїчний підхід до тематичного аналізу та ґрунтується на факторизації матриці «термін × документ» на дві невід’ємні матриці меншої розмірності [4, 6]. *c*-TF-IDF, на відміну від двох попередніх підходів, орієнтований на побудову репрезентативних тематичних описів для попередньо виділених кластерів документів і особливо ефективний у поєднанні із сучасними методами векторного представлення текстів [7, [8].

Узагальнення теоретичної основи та принципу роботи розглянутих моделей подано в табл. 1.

Таблиця 1 – Теоретична основа та принцип роботи тематичних моделей

Модель	Коротка сутність	Основний механізм
LDA	Генеративна імовірнісна модель	Документи моделюються як суміші тем (розподіл Діріхле). Темі є розподілами слів
NMF	Лінійно-алгебраїчний розклад	Розклад матриці «термін × документ» у невід’ємні фактори W та H (ранг K)
<i>c</i> -TF-IDF	Кластеризація на ембедингах	Інформаційно-пошукова вага терміна для кластера або «метадокумента» після кластеризації за допомогою UMAP/HDBSCAN

Як видно з табл. 1, розглянуті моделі відрізняються не лише технічною реалізацією, а й способом формування тематичного представлення тексту. LDA формує теми в межах імовірнісної генеративної схеми, NMF спирається на матричну факторизацію, тоді як *c*-TF-IDF працює в межах кластерно-орієнтованого підходу. Саме ця відмінність методологічної основи визначає різницю в інтерпретованості результатів, стійкості моделей та їх придатності до роботи з короткими й неоднорідними текстами [3, 5, 7, 8].

Порівняльний аналіз якісних характеристик розглянутих моделей дає змогу точніше оцінити їх придатність до дослідження корпусів, у яких

висвітлюється використання штучного інтелекту в дистанційній освіті. Для таких текстів суттєвими є не лише формальна здатність моделі виокремлювати теми, а й когерентність тематичних описів, рівень їх інтерпретованості та відповідність людському сприйняттю змісту. Узагальнення цих характеристик подано в табл. 2.

Таблиця 2 – Якісні характеристики, інтерпретованість та оцінка тем

Критерій	LDA	NMF	c-TF-IDF (BERTopic)
Когерентність / Інтерпретованість	Середня. Висока лише на довших текстах. Чутлива до вибору K	Висока. Формує «частинно-орієнтовані» теми	Найвища. Завдяки контекстним ембедингам та c-TF-IDF [8]
Робота з короткими текстами	Низька. Базова LDA програє; потрібні спеціалізовані версії	Добре. Демонструє переваги на розріджених даних	Відмінно. Розроблено для коротких і різномірних даних [3]
Людиноцентрична оцінка	Не завжди узгоджується з людським сприйняттям на коротких даних	Часто добре сприймається експертами через «гостріші» теми	Найкраща. Найвища відповідність людським судженням у нових роботах [8]

Як видно з табл. 2, LDA зберігає значення як класичний інтерпретований підхід, однак його результати суттєво залежать від довжини текстів і параметричної конфігурації моделі [3, 8].

NMF у багатьох випадках формує чіткіші тематичні профілі, особливо для розріджених даних, однак не позбавлений проблеми залежності від ініціалізації та конфігурації факторизації [3, 4, 6, 8].

c-TF-IDF у поєднанні з embedding-based підходами демонструє найкращі результати щодо когерентності, інтерпретованості й людиноцентричної оцінки, що робить його особливо перспективним для аналізу коротких та неоднорідних текстів [3, 7, 8].

Таким чином, проведений порівняльний аналіз засвідчує, що жоден із розглянутих методів окремо не забезпечує повного врахування специфіки текстових корпусів, у яких висвітлюється використання штучного інтелекту в дистанційній освіті. LDA забезпечує добру статистичну основу та інтерпретованість, але слабше враховує контекст; NMF дає більш сфокусовані профілі, проте залишається чутливим до конфігурації моделі; c-TF-IDF підвищує виразність тематичних описів, але залежить від якості попередньої кластеризації та векторного представлення текстів [3, 4, 7, 8]. Це зумовлює необхідність пошуку таких методичних рішень, які дозволяють поєднати інтерпретованість, контекстуальну чутливість і змістову релевантність тематичного аналізу.

Передумови вдосконалення тематичного моделювання для задач дистанційної освіти

Проведений порівняльний аналіз LDA, NMF і c-TF-IDF показав, що кожен із цих підходів має власні переваги, проте жоден із них окремо не забезпечує

повного врахування специфіки текстових корпусів, у яких висвітлюється використання штучного інтелекту в дистанційній освіті. Для цієї предметної області характерними є короткі та неоднорідні тексти, міждисциплінарна термінологія, швидке оновлення проблематики та потреба в інтерпретованому представленні тематичної структури. Саме тому питання вдосконалення тематичного моделювання в такому контексті набуває не лише методичного, а й прикладного значення [3, 5, 8].

Однією з ключових передумов удосконалення є обмеженість статичних неконтекстуальних моделей при роботі з короткими текстами. Для LDA проблема полягає в розрідженості даних і залежності якості тем від наперед заданої кількості компонент, тоді як для NMF суттєвими залишаються чутливість до ініціалізації та залежність від параметризації факторизації [3, 4, 6]. Хоча c-TF-IDF демонструє вищу якість тематичних описів, його результативність значною мірою визначається якістю попередньої кластеризації та характеристиками векторного простору документів [7, 8].

Важливою умовою підвищення якості тематичного аналізу є також коректна попередня обробка корпусу. Уніфікована нормалізація тексту, видалення стоп-слів, лематизація та фільтрація надто коротких і надто довгих документів дозволяють зменшити варіативність корпусу, знизити вплив шумової інформації та сформувати більш однорідне семантичне середовище для подальшого тематичного структурування. Унаслідок цього попередню обробку доцільно розглядати не як суто технічний етап, а як одну з методичних передумов підвищення якості моделювання [3, 7, 9, 10].

Не менш важливою є потреба у врахуванні контексту. У традиційних моделях, побудованих на принципі «мішка слів», семантичні зв'язки між словами істотно спрощуються, через що модель гірше відображає змістові нюанси освітніх текстів. Для корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, це особливо критично, оскільки одна й та сама лексика може належати до різних тематичних площин: педагогічної, технологічної, етичної або організаційної. Саме тому сучасні підходи дедалі частіше спираються на контекстні векторні представлення текстів, які дозволяють точніше відображати семантичну близькість документів і формувати більш когерентні тематичні кластери [5, 7].

Ще однією передумовою є необхідність переходу від жорстко параметризованих моделей до підходів, у яких тематична структура виводиться з геометрії простору ембедингів. Аналіз поведінки базових моделей показує, що якість тематичного моделювання суттєво залежить від параметризації, а вибір кількості тем не є тривіальним. Це зумовлює зростання інтересу до BERTopic-подібних конвеєрів, які поєднують контекстні представлення текстів, зниження розмірності за допомогою Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) та кластеризацію Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN), після чого тематичні описи уточнюються через c-TF-IDF [7, 9, 10].

Додатково залежність якості тематичного моделювання від вибору кількості тем доцільно проілюструвати на прикладі когерентності NPMI для LDA та NMF (рис. 1). Саме така залежність показує, що параметризація класичних моделей не має універсального значення і потребує окремого обґрунтування для конкретного корпусу. У цьому контексті важливо, що зміна кількості тем безпосередньо впливає на змістову узгодженість отриманих тематичних структур, а отже – і на їх подальшу інтерпретованість.

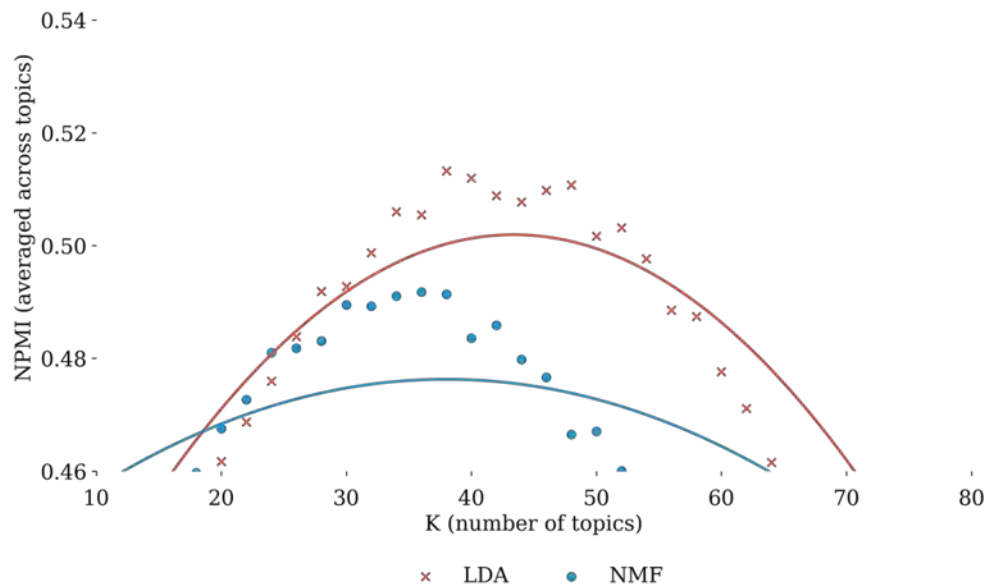


Рисунок 1 – Когерентність (NPMI) проти кількості тем (LDA проти NMF)

Як видно з рис. 1, когерентність тематичних моделей змінюється залежно від кількості тем, причому характер цієї залежності для LDA та NMF є різним. Це підтверджує, що вибір кількості тем не може розглядатися як суто технічне налаштування, оскільки він безпосередньо впливає на якість тематичної репрезентації корпусу. Для задач аналізу текстових матеріалів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, така чутливість до параметризації є особливо важливою, оскільки неоднорідність і міждисциплінарність корпусу ускладнюють застосування фіксованих конфігурацій. Саме це додатково обґрунтовує доцільність переходу до підходів, у яких тематична структура визначається не лише параметрами моделі, а й контекстною близькістю документів та їх просторовою організацією.

Отже, чутливість класичних тематичних моделей до параметризації додатково підтверджує доцільність переходу до підходів, у яких тематична структура визначається не лише наперед заданими параметрами, а й контекстною близькістю документів та їх просторовою організацією. Така архітектура виявляється особливо продуктивною для коротких і різномірних корпусів, оскільки дозволяє уникнути частини обмежень, властивих класичним тематичним моделям [3, 7, 8].

Узагальнення характеристик, пов'язаних зі стабільністю, масштабованістю та чутливістю до гіперпараметрів, подано в табл. 3.

Таблиця 3 – Стабільність, масштабованість та чутливість до гіперпараметрів

Критерій	LDA	NMF	c-TF-IDF (BERTopic)
Стабільність / Робастність	Схильна до варіацій від ініціалізації; потрібна оцінка стабільності (перезапуски/бутстреп)	Залежить від рангу K та ініціалізації W, H	Залежить від якості ембедингів і параметрів UMAP/HDBSCAN; можливі дрібні кластери / «викиди», потрібна агрегація [7, 9, 10]
Ефективність / Масштабованість	Існують online-варіанти та наближені схеми інференції, але якість чутлива до налаштувань [1, 2]	Добре векторизується та зручна для матричних обчислень [4, 6]	Найбільші витрати припадають на побудову ембедингів, UMAP і HDBSCAN; побудова c-TF-IDF є відносно дешевою [7, 9, 10]
Чутливість до гіперпараметрів	Висока: кількість тем і параметри апріорних розподілів [1, 3]	Висока: ранг K та початкова ініціалізація [4, 6]	Дуже висока: вибір моделі ембедингів та параметрів UMAP/HDBSCAN [7, 9, 10]

Як видно з табл. 3, проблема вдосконалення тематичного моделювання полягає не лише в підвищенні когерентності тем, а й у забезпеченні їх стійкості, масштабованості та керованості. Для задач дистанційної освіти це особливо важливо, оскільки аналізовані корпуси можуть бути як короткими й фрагментованими, так і часово протяжними, коли потрібно фіксувати зміни тематичної структури в динаміці [3, 5, 8].

Отже, сукупність виявлених обмежень і вимог формує логічні передумови для переходу до гібридної методики тематичного моделювання, а далі – до формалізованих контекстуально-динамічних рішень.

Саме в цій логіці доцільно розглядати фреймворк DCTM-LLM як подальший етап розвитку засобів аналізу текстових корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті [5, 7, 8].

Формалізований фреймворк динамічного контекстуального тематичного моделювання

Гібридна методика на основі інформованих пріорів для LDA підвищує змістову релевантність тематичних структур, проте не усуває повністю обмежень статичного тематичного моделювання. У зв'язку з цим доцільним є перехід до фреймворку DCTM-LLM, який поєднує контекстне представлення текстів, динамічне тематичне структурування та семантичне узагальнення результатів [5, 11-14]. Цей підхід орієнтований на аналіз часово-мічених текстових корпусів, у яких важливо не лише виявити змістові напрями, а й простежити їх еволюцію в часі.

Перш за все формалізується постановка задачі. Нехай задано часово-мічений текстовий корпус:

$$D = \{(d_i, t_i)\}_{i=1}^N, \quad (1)$$

де d_i – текст i -го документа;
 t_i – його часова мітка;
 N – загальна кількість документів у корпусі.

Метою є побудова множини динамічних тематичних траєкторій:

$$T = \{T_m\}_{m=1}^M, \quad (2)$$

де T_m – m -та динамічна траєкторія, яка описує еволюцію окремого тематичного напрямку в часі;

M – загальна кількість таких траєкторій.

Кожна траєкторія надалі доповнюється короткою назвою, розгорнутим нарративним описом і набором ключових термінів, що характеризують її зміст на різних часових інтервалах. У такій постановці тема розглядається не як ізольований кластер, а як послідовність змістових станів, пов'язаних часовою логікою розвитку.

Концептуально DCTM-LLM реалізується як послідовність взаємопов'язаних етапів: попередня обробка корпусу, побудова контекстних векторних представлень документів, тематичне структурування із застосуванням процедур зниження розмірності та кластеризації, формування лексичних профілів тем і подальше семантичне узагальнення результатів. Така організація дає змогу перейти від статичного переліку ключових слів до динамічних тематичних траєкторій, що відображають розвиток змістових ліній у часі [7, 9, 10, 15, 16]. Особливість цього підходу полягає в тому, що контекстуальна близькість документів визначається не лише частотними характеристиками слів, а й їхнім розміщенням у семантичному просторі, сформованому на основі сучасних мовних моделей.

Структурну логіку реалізації запропонованого підходу доцільно подати у вигляді схеми, що відображає перехід від вхідного корпусу до інтерпретованих тематичних траєкторій і нарративних описів (рис. 2). У межах такого конвеєра попередньо оброблений корпус трансформується в множину контекстних векторних представлень, на основі яких формуються локальні тематичні утворення, що далі пов'язуються між собою в часовій перспективі. Результатом є не лише тематичне структурування документів, а й можливість простежити зміни змістових акцентів у межах окремих тематичних напрямів.

Як показує рис. 2, запропонований підхід реалізує завершений аналітичний конвеєр: від попередньо обробленого корпусу та побудови його контекстного представлення – до формування динамічних тематичних утворень, їх лексичної репрезентації та автоматизованого синтезу нарративів засобами великої мовної моделі. Саме така структурна організація дозволяє поєднати контекстну чутливість, часовий аналіз і подальше інтерпретаційне узагальнення.

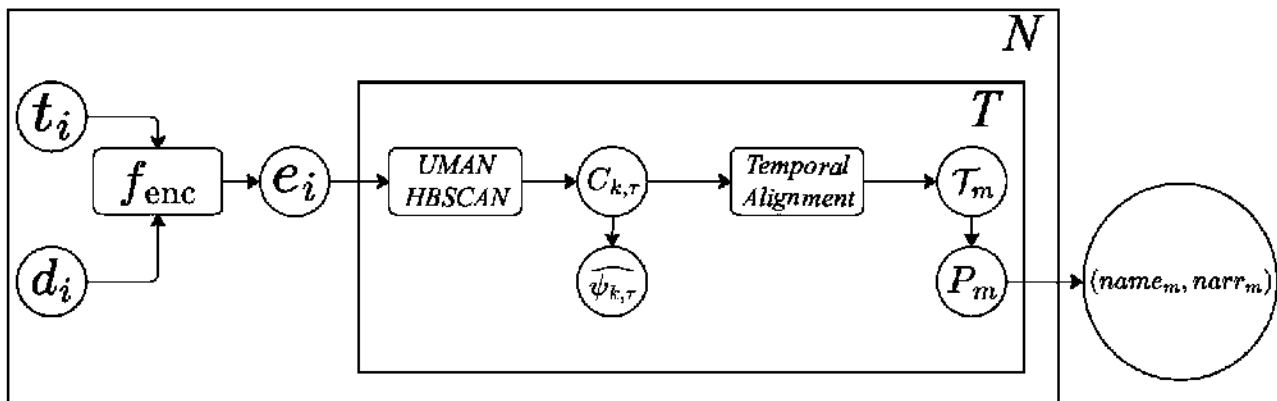


Рисунок 2 – Структурна схема реалізації методу DCTM-LLM

Структурна схема реалізації методу DCTM-LLM на рисунку 2 відображає послідовність трансформації даних від вхідного корпусу (d_i, t_i) до отримання інтерпретованих тематичних траєкторій T_m та наративних описів $(name_m, narr_m)$.

Особливістю цього підходу є те, що велика мовна модель (LLM) використовується не як заміна тематичного моделювання, а як засіб інтерпретаційного доопрацювання вже виявлених тематичних структур. Генеративний етап можна подати як відображення:

$$(name_m, narr_m) = g_{\Theta}(P_m), \quad (3)$$

де $name_m$ – коротка назва m -тої тематичної траєкторії;

$narr_m$ – її наративний опис;

P_m – сформований для неї prompt;

g_{Θ} – відображення типу «prompt \rightarrow текстова відповідь», реалізоване великою мовною моделлю з фіксованими параметрами Θ .

Унаслідок цього формальні кількісні характеристики тем трансформуються в людиноінтерпретовані описи, придатні для подальшого аналітичного тлумачення [13, 14]. Отже, фреймворк поєднує алгоритмічну строгість тематичного структурування з інтерпретаційною гнучкістю генеративних моделей.

З методичного погляду DCTM-LLM забезпечує поєднання трьох взаємопов'язаних вимірів аналізу: контекстної чутливості, часової динаміки та семантичного узагальнення. Це дозволяє істотно розширити аналітичні можливості тематичного моделювання для корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, де змістові акценти можуть швидко змінюватися під впливом розвитку технологій, освітніх практик і суспільних очікувань [5, 11, 12]. Саме така інтеграція створює підґрунтя для подальшого розгляду переваг, інноваційних відмінностей і результатів оцінювання запропонованої методики.

Переваги, інноваційні відмінності та оцінка результатів методики DCTM-LLM

Переваги фреймворку DCTM-LLM доцільно розглядати в порівнянні з підходами, що вже були проаналізовані в попередніх підрозділах. На відміну від статичних тематичних моделей, запропонована методика поєднує контекстне представлення текстів, динамічне структурування тем і нарративне узагальнення результатів. Саме така інтеграція визначає її головну інноваційну відмінність: тема в межах DCTM-LLM постає не як статичний набір ключових слів, а як динамічна тематична траєкторія, що дозволяє простежувати еволюцію тематичних ліній у часі [5, 7, 8, 11].

Для оцінювання методики застосовано комплекс взаємодоповнювальних показників, які відображають як якість тематичної структури, так і рівень інтерпретованості результатів. До них належать когерентність тем як базовий критерій змістової узгодженості, структурні метрики кластеризації для оцінювання відокремленості та стабільності тематичних утворень, Topic Diversity@10 для вимірювання лексичної унікальності топ-термінів, а також метрика BERTScore F1 для оцінювання семантичної відповідності згенерованих нарративів референтним описам. Така багатокритеріальна рамка дає змогу аналізувати не лише формальну якість тематичного моделювання, а й аналітичну придатність отриманих результатів. Важливо, що вибір саме такої системи показників дозволяє оцінювати DCTM-LLM одночасно в кількох вимірах. Якщо когерентність і Topic Diversity@10 характеризують якість тематичного представлення та лексичного розмежування тем, то Silhouette і ARI відображають структурну чіткість і стабільність кластеризації. Своєю чергою BERTScore F1 виводить оцінювання за межі суто статистичних характеристик і дає змогу врахувати, наскільки згенеровані нарративні описи справді зберігають семантичний зміст тематичних утворень. У підсумку така система метрик є релевантною саме для DCTM-LLM, оскільки цей фреймворк поєднує структурне тематичне моделювання з інтерпретаційним узагальненням результатів.

Узагальнені результати порівняння DCTM-LLM із Dynamic BERTopic та гібридним підходом LDA+NMF+c-TF-IDF наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Показники якості моделей тематичного моделювання (корпус cs.AI, 2015-2025)

Метрика	Dynamic BERTopic	LDA+NMF+c-TF-IDF	DCTM-LLM
NPMI ↑	0.48	0.51	0.53
Silhouette ↑	0.59	0.61	0.62
ARI ↑	0.45	0.52	0.55
Topic Diversity@10 ↑	0.82	0.85	0.88
BERTScore F1 ↑	0.62	0.65	0.89

Примітка: стрілкою ↑ позначено метрики, для яких більше значення означає кращу якість

Як видно з табл. 4, DCTM-LLM перевищує альтернативні підходи як за структурними, так і за семантичними показниками. Це означає, що запропонована методика не лише формує більш узгоджені тематичні структури, а й забезпечує вищу якість їх інтерпретаційного представлення. Особливо

показовою є різниця за BERTScore F1, що свідчить про суттєве покращення нарративного узагальнення результатів.

Такий розподіл результатів дозволяє зробити важливий методичний висновок: перевага DCTM-LLM не зводиться до покращення лише одного окремого аспекту аналізу. Навпаки, запропонований підхід демонструє більш збалансовану якість у межах усієї системи оцінювання. Підвищення NPMI свідчить про кращу змістову зв'язність тем, вищі значення Silhouette та ARI - про якісніше групування документів і стабільніше відтворення тематичних утворень, а зростання Topic Diversity@10 та BERTScore F1 - про більш виразну й аналітично корисну інтерпретацію результатів. Саме ця сукупність ознак дозволяє розглядати DCTM-LLM як більш придатний інструмент для дослідження складних міждисциплінарних корпусів.

Для кількісної оцінки внеску окремих компонентів фреймворку було проведено абляційний аналіз. Його результати щодо структурної якості кластеризації подано в табл. 5.

Таблиця 5 – Вплив компонентів DCTM-LLM на показники структурної кластеризації

Configuration	Noise	Silhouette	ARI
DCTM-LLM	8.5%	0.62	0.55
no-LLM-refinement	8.5%	0.60 (Δ -0.02)	0.52 (Δ -0.03)
no-UMAP	14.2%	0.40 (Δ -0.22)	0.35 (Δ -0.20)
HDBSCAN \rightarrow k-means	0.0%	0.54 (Δ -0.08)	0.48 (Δ -0.07)
c-TF-IDF \rightarrow TF-IDF	8.5%	0.62 (Δ 0.00)	0.55 (Δ 0.00)

Таблиця 5 показує, що найбільш критичний вплив на структурну якість моделі мають компоненти, пов'язані з геометрією простору та кластеризацією. Відмова від UMAP спричиняє найвідчутніше погіршення структурних показників, а заміна HDBSCAN на k-means також знижує якість відокремлення тематичних утворень. Це підтверджує, що блок просторового подання та кластеризації є одним із визначальних для стабільності DCTM-LLM. Водночас вилучення LLM-refinement не руйнує структуру кластерів, але знижує загальну узгодженість результатів, що особливо помітно на рівні їх інтерпретації. Іншими словами, результати абляційного аналізу дозволяють розмежувати внесок окремих компонентів фреймворку. UMAP і HDBSCAN у більшій мірі забезпечують геометричну та структурну якість тематичного простору, тоді як LLM-refinement істотно впливає на завершальний етап інтерпретації та подання результатів. У цьому контексті DCTM-LLM доцільно розглядати не як механічне поєднання кількох інструментів, а як узгоджену систему, у якій кожен компонент відповідає за окремий рівень аналітичної якості. Саме така багаторівнева організація і пояснює, чому вилучення будь-якого з елементів фреймворку позначається на загальному результаті.

Семантичний внесок окремих компонентів відображено в табл. 6.

Таблиця 6 – Вплив компонентів DCTM-LLM на семантичні метрики та якість інтерпретації

Configuration	NPMI	Topic Diversity@10	BERTScore F1
DCTM-LLM	0.53	0.88	0.89
no-LLM-refinement	0.51 (Δ -0.02)	0.86 (Δ -0.02)	0.62 (Δ -0.27)
no-UMAP	0.45 (Δ -0.08)	0.80 (Δ -0.08)	0.75 (Δ -0.14)
HDBSCAN \rightarrow k-means	0.49 (Δ -0.04)	0.83 (Δ -0.05)	0.81 (Δ -0.08)
c-TF-IDF \rightarrow TF-IDF	0.44 (Δ -0.09)	0.81 (Δ -0.07)	0.80 (Δ -0.09)

Як видно з табл. 6, найбільш різке погіршення BERTScore F1 відбувається при вилученні LLM-refinement. Це означає, що саме цей компонент забезпечує головний внесок у формування якісних нарративних описів і перехід від списків ключових термінів до змістовно зв'язаних тематичних інтерпретацій. Водночас відмова від UMAP і c-TF-IDF негативно впливає на когерентність і тематичну різноманітність, що підтверджує їхню важливість для структурної та лексичної організації моделі. Таким чином, аналітична цінність DCTM-LLM формується не одним окремим елементом, а сукупною дією взаємопов'язаних компонентів. У цьому контексті інтерпретованість результатів DCTM-LLM доцільно розглядати як інтегральну властивість фреймворку, що виникає внаслідок послідовного поєднання кількох рівнів аналітичної обробки. Формування тематичної структури, її просторово-кластерна організація та подальше нарративне узагальнення утворюють єдиний ланцюг, у межах якого кожен етап впливає на якість кінцевої інтерпретації. З огляду на це зниження BERTScore F1 у разі вилучення LLM-refinement слід тлумачити як індикатор послаблення інтерпретаційної спроможності всього підходу, а не як ізольовану зміну окремого показника. Для аналізу текстових корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, така властивість є принципово важливою, оскільки забезпечує можливість переходу від формального тематичного структурування до змістовно обґрунтованих наукових висновків.

Однією з ключових переваг методики DCTM-LLM є можливість відображення зміни змістових акцентів у межах окремого тематичного напрямку в часовій перспективі. На відміну від статичного тематичного моделювання, такий підхід дозволяє працювати не лише з фіксованим набором ключових слів, а й з послідовною еволюцією тематичного ядра. Це особливо важливо для аналізу наукового дискурсу щодо використання штучного інтелекту в освіті, де дослідницькі пріоритети змінюються під впливом розвитку технологій, методологічних підходів та суспільних запитів. Така аналітична можливість ілюструється на прикладі тематики Explainable Artificial Intelligence (XAI), у межах якої простежується поступове зміщення уваги від локальних інструментів інтерпретації до каузальних, контрфактичних і етично орієнтованих підходів (рис. 3).

Як показано на рис. 3, динамічне тематичне моделювання дозволяє виявити не лише наявність окремих змістових ліній у межах XAI, а й зміну їх відносної ваги в часі. Якщо на ранніх етапах домінують локальні підходи до

інтерпретації, пов'язані з LIME та SHAP, то в подальшому посилюється увага до візуалізації механізмів transformer-моделей, каузальних і контрфактичних пояснень, а також до проблематики справедливості й етичного аудиту штучного інтелекту.

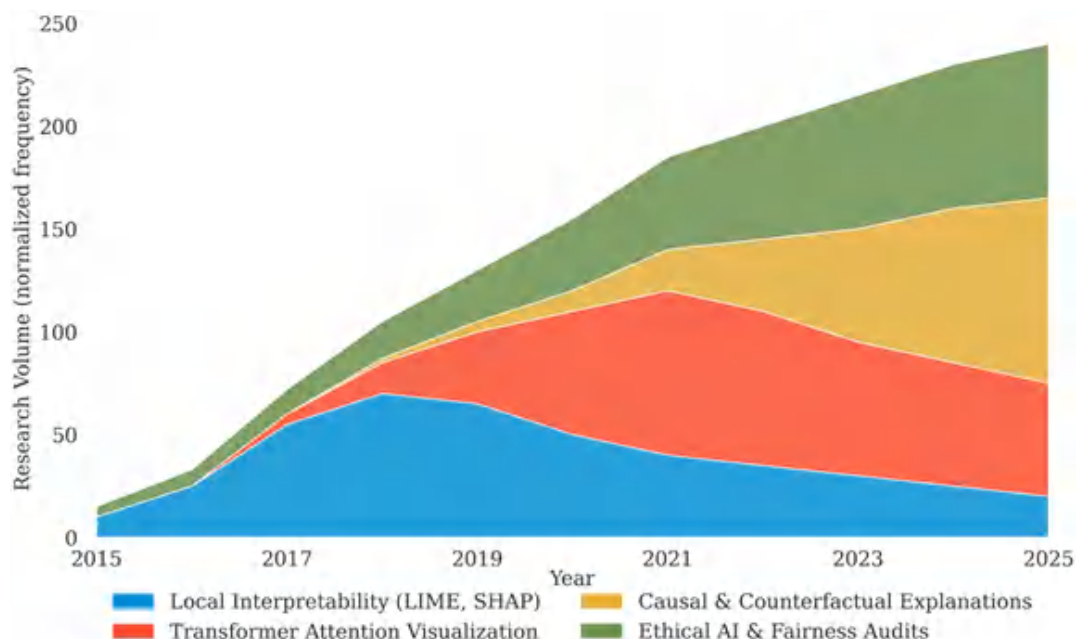


Рисунок 3 – Тематична еволюція «Пояснюваного штучного інтелекту (XAI)» з часом

Це підтверджує, що DCTM-LLM є придатним не лише для тематичного структурування корпусу, а й для виявлення діахронічної еволюції дослідницьких акцентів. У цьому виявляється його принципова методична перевага над статичними моделями, які, як правило, фіксують лише синхронний тематичний зріз корпусу. Натомість DCTM-LLM уможливорює перехід до аналізу тем як динамічних утворень, внутрішня логіка яких розкривається через зміну доміантних понять, інтерпретаційних рамок і дослідницьких пріоритетів у часовій перспективі. Для вивчення використання штучного інтелекту в дистанційній освіті це має особливу аналітичну цінність, оскільки дозволяє не лише констатувати наявність певних тематичних напрямів, а й виявляти закономірності їх розвитку, переорієнтації та змістового ускладнення. Такий підхід істотно розширює інтерпретаційний потенціал тематичного моделювання, переводячи його з рівня опису до рівня змістового пояснення еволюції предметної області.

Узагальнюючи результати, подані в табл. 5-6, можна зробити висновок, що всі базові компоненти фреймворку – UMAP, HDBSCAN, c-TF-IDF і LLM-refinement – роблять істотний і взаємодоповнювальний внесок у якість моделі. Вилучення будь-якого з них призводить до погіршення або структурних, або семантичних показників, тоді як повна конфігурація DCTM-LLM забезпечує найкращий баланс між когерентністю, різноманітністю та інтерпретованістю результатів. Саме це дозволяє розглядати DCTM-LLM як методику, що формує вищий рівень аналітичної придатності для дослідження текстових корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті.

Висновки

Обґрунтовано доцільність використання тематичного моделювання як методу аналізу текстових корпусів, у яких відображено використання штучного інтелекту в дистанційній освіті. Показано, що для цієї предметної області характерними є короткі та неоднорідні тексти, міждисциплінарна термінологія, контекстуальна варіативність і часова динаміка змісту, що ускладнює застосування класичних тематичних моделей без додаткового методичного вдосконалення. Це дає підстави розглядати тематичне моделювання в даному контексті не як універсальний інструмент, а як аналітичний підхід, ефективність якого безпосередньо залежить від урахування специфіки корпусу, характеру тематичної структури та вимог до інтерпретованості результатів.

У результаті порівняльного аналізу встановлено, що LDA, NMF і c-TF-IDF репрезентують різні підходи до тематичного моделювання та мають різні аналітичні можливості. LDA зберігає значення як класична імовірнісна модель, але виявляє обмеження при роботі з короткими й розрідженими текстами. NMF формує більш сфокусовані тематичні профілі, однак залишається чутливою до ініціалізації та параметризації. c-TF-IDF у поєднанні з embedding-based підходами є особливо придатним до аналізу коротких і неоднорідних текстів, хоча залежить від якості попередньої кластеризації. У підсумку показано, що жоден із зазначених підходів окремо не забезпечує повного врахування особливостей текстових корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, що зумовлює потребу в подальшому розвитку методичних засобів тематичного аналізу.

На основі виявлених обмежень обґрунтовано доцільність переходу до гібридної методики на основі інформованих пріорів, а далі - до фреймворку DSTM-LLM. Запропонований підхід поєднує контекстне представлення текстів, динамічне тематичне структурування та автоматизоване наративне узагальнення, що дозволяє перейти від статичних тематичних описів до інтерпретованих тематичних траєкторій. Його методична перевага полягає в тому, що тематична структура корпусу розглядається не як фіксований результат одноразового моделювання, а як динамічне утворення, зміст якого може змінюватися в часовій перспективі. Це розширює аналітичні можливості дослідження та створює підґрунтя для більш змістового осмислення еволюції тематичних пріоритетів у відповідній предметній області.

Узагальнення результатів оцінювання показало, що DSTM-LLM забезпечує кращий баланс між когерентністю, структурною стабільністю, різноманітністю тем і якістю інтерпретації, ніж менш інтегровані підходи. Абляційний аналіз підтвердив, що всі ключові компоненти фреймворку – UMAP, HDBSCAN, c-TF-IDF і LLM-refinement – роблять істотний і взаємодоповнювальний внесок у якість моделі. Це свідчить про те, що аналітична результативність DSTM-LLM формується не окремими локальними покращеннями, а узгодженою взаємодією кількох рівнів обробки даних:

структурного, просторово-кластерного та інтерпретаційного. З огляду на це запропоновану методику доцільно розглядати як перспективний інструмент аналізу текстових корпусів, присвячених використанню штучного інтелекту в дистанційній освіті, який забезпечує не лише формальне виявлення тематичних структур, а й створює умови для їх подальшого наукового осмислення.

Список літератури.

1. Blei, D.M., Ng, A.Y., & Jordan, M.I. (2003). Latent Dirichlet allocation. *Journal of Machine Learning Research*, (3), 993-1022.
2. Blei, D.M. (2012). Probabilistic topic models. *Communications of the ACM*, 55(4), 77-84. <https://doi.org/10.1145/2133806.2133826>.
3. Fan, Y., Shi, L., & Yuan, L. (2023). Topic modeling methods for short texts: A survey. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 45(2), 1971-1990. <https://doi.org/10.3233/JIFS-223834>.
4. Gillis, N. (2020). Nonnegative matrix factorization. SIAM. <https://doi.org/10.1137/1.9781611976410>.
5. Wu, X., Nguyen, T., & Luu, A. T. (2024). A survey on neural topic models: Methods, applications, and challenges. *Artificial Intelligence Review*, 57(2), 18. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10661-7>.
6. Lee, D.D., & Seung, H.S. (1999). Learning the parts of objects by non-negative matrix factorization. *Nature*, (401), 788-791. <https://doi.org/10.1038/44565>.
7. Grootendorst, M. (2022). BERTopic: Neural topic modeling with a class-based TF-IDF procedure. arXiv preprint arXiv:2203.05794. <https://arxiv.org/abs/2203.05794>.
8. Egger, R., & Yu, J. (2022). A topic modeling comparison between LDA, NMF, Top2Vec, and BERTopic to demystify Twitter posts. *Frontiers in Sociology*, (7), Article 886498. <https://doi.org/10.3389/fsoc.2022.886498>.
9. McInnes, L., Healy, J., Saul, N., & Großberger, L. (2018). UMAP: Uniform manifold approximation and projection. *Journal of Open Source Software*, 3(29), 861. <https://doi.org/10.21105/joss.00861>.
10. McInnes, L., & Healy, J. (2017). Accelerated hierarchical density clustering. arXiv preprint arXiv:1705.07321. <https://arxiv.org/abs/1705.07321>.
11. Wu, X., Dong, X., Pan, L., Nguyen, T., & Luu, A. T. (2024). Modeling dynamic topics in chain-free fashion by evolution-tracking contrastive learning and unassociated word exclusion. *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2024*, 3088-3105. <https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-acl.183>.
12. Fil, N. Yu., Slisarenko, R.V., Deineko, Zh.V., & Morozova, L.Yu. (2025). Trends in artificial intelligence research on education: Topic modeling using latent Dirichlet allocation. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, (108), 17-24. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.17>.
13. Khandelwal, T. (2025). Using LLM-based approaches to enhance and automate topic labeling. arXiv preprint arXiv:2502.18469. <https://arxiv.org/abs/2502.18469>.
14. Jenner, S., Raidos, D., Anderson, E., Fleetwood, S., Ainsworth, B., Fox, K., Kreppner, J., & Barker, M. (2025). Using large language models for narrative analysis: A novel application of generative AI. *Methods in Psychology*, (12), 100183. <https://doi.org/10.1016/j.metip.2025.100183>.
15. Devlin, J., Chang, M.-W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805. <https://arxiv.org/abs/1810.04805>.
16. Logan, C.H.A., & Fotopoulou, S. (2020). Unsupervised star, galaxy, QSO classification: Application of HDBSCAN. *Astronomy and Astrophysics*, (633), A154. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201936648>.

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ІНТЕГРАЦІЇ ЦИФРОВИХ НАВЧАЛЬНИХ ІГОР У МУЛЬТИМЕДІЙНІ ОСВІТНІ РЕСУРСИ

Хорошевська І.О.

к.е.н., доцентка, доцентка, кафедра Мультимедійних систем і технологій,
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця,
ORCID: 0000-0001-8990-9891

***Анотація.** Досліджено методичні засади інтеграції цифрових навчальних ігор у мультимедійні освітні ресурси. Обґрунтовано педагогічну доцільність використання цифрових ігор у структурі таких ресурсів, описано навчально-розвиткові функції, розглянуто вміст і особливості різновидів ігор, доцільних для реалізації у мультимедійних освітніх ресурсах. Узагальнено етапи розроблення цифрової навчальної гри як структурно-змістового елемента мультимедійного ресурсу та наведено приклади практичної реалізації таких навчальних ігор.*

***Ключові слова:** мультимедійні освітні ресурси, цифрові навчальні ігри, педагогічна доцільність, підходи до інтеграції, різновиди ігор.*

Вступ

Сучасні мультимедійні освітні ресурси (МОР), зокрема мультимедійні інтерактивні навчальні курси і комплекси [1-5], мультимедійні системи в освіті [6, 7] тощо, дедалі виразніше набувають ознак повноцінних інтерактивних освітніх середовищ, здатних забезпечувати активну участь користувачів у навчальній діяльності. Їхня ефективність зумовлена цілісністю, повнотою та комплексністю подання тематичного медіаконтенту певної предметної області, а також потужною реалізацією інтерактивної складової у вигляді інтерактивних завдань, вправ, навчальних ігор, тестів різного рівня складності, симуляцій та інших засобів навчальної взаємодії, об'єднаних у єдиний багатокomпонентний навчальний простір [5, 8, 9]. Таке трактування МОР узгоджується з сучасним розумінням інтерактивних мультимедійних середовищ як систем, що поєднують навчальний зміст і засоби підтримки навчальної активності користувача.

Одним із найбільш перспективних і водночас функціонально насичених компонентів таких мультимедійних ресурсів є цифрові навчальні ігри (ЦНІ) [10]. Інтерес до їх використання в сучасній мультимедійній освіті зумовлений тим, що вони поєднують освітній зміст з ігровими механіками, завдяки чому процес засвоєння знань стає для користувача більш динамічним і емоційно привабливим, а також сприяє більш активній навчальній взаємодії. Подання навчального матеріалу в ігровій формі дає змогу зменшити труднощі його сприйняття, створити комфортне для користувача середовище, забезпечити оперативний зворотний зв'язок і підтримати стійкий пізнавальний інтерес. За

таких умов користувач не лише сприймає інформацію, а й активно взаємодіє з нею, експериментує, аналізує результати власних дій і поступово формує практичні вміння та досвід застосування знань у наближених до реальних або змодельованих ситуаціях.

У цьому контексті ЦНІ виступають не лише засобом активізації уваги, а й інструментом організації цілеспрямованої навчальної діяльності користувача.

Особливої цінності ЦНІ набувають завдяки своєму потенціалу до індивідуалізації навчання. Варіативність завдань, можливість налаштування рівнів складності, темпу проходження, форм подання підказок, порад і рекомендацій (текстових, аудіо-, відео-), типів зворотного зв'язку тощо – все це створює умови для адаптації навчального процесу до індивідуальних потреб, можливостей і навчальних уподобань користувача. У межах мультимедійного ресурсу це посилюється застосуванням різних типів медіаконтенту (текстового, графічного, аудіо-, відеоматеріалу), що сприяє кращій наочності, активізує різні канали сприйняття навчальної інформації та підвищує якість її засвоєння.

Саме миттєвий зворотний зв'язок і можливість повторного проходження завдань посилюють дидактичний ефект ЦНІ та сприяють кращому засвоєнню навчального матеріалу. У цьому контексті ЦНІ виконують не лише мотиваційну, а й розвивальну функцію, що проявляється у формуванні і розвитку широкого спектра когнітивних, творчих та професійно-орієнтованих компетентностей.

Когнітивні навички розвиваються, зокрема, у процесах: концентрації уваги на завданнях і швидкого реагування на зміни ігрової ситуації; тренування пам'яті через повторення правил, сюжетних елементів і стратегій гри; формування логічного мислення завдяки встановленню причинно-наслідкових зв'язків; розвитку аналітичного мислення під час оцінювання результатів власних дій і вибору оптимальних рішень серед кількох можливих варіантів.

Творчі навички проявляються у здатності генерувати нестандартні рішення, адже ігрові завдання часто мають кілька шляхів виконання. Це стимулює появу нових ідей, імпровізацію та застосування креативних стратегій.

Професійно-орієнтовані компетентності формуються під час виконання практико-спрямованих ігрових дій у змодельованих ситуаціях. Це може включати роботу з інформацією, командне прийняття рішень, планування ресурсів чи виконання ролей, що відповідають майбутнім професійним завданням.

Таким чином, ЦНІ стають ефективним інструментом формування навичок, які мають практичне значення для подальшої освітньої та професійної діяльності, а також особистісного розвитку користувача.

ЦНІ, реалізовані в освітньому просторі МОР, стимулюють самостійну діяльність користувача, сприяють формуванню досвіду прийняття рішень і підвищують загальну мотивацію до навчання як у межах вивчення певної освітньої компоненти, так і в процесі самонавчання користувача з метою його саморозвитку в певних темах та питаннях життєдіяльності. Це підтверджує

доцільність використання ЦНІ не як допоміжних елементів, а як повноцінних складових структури МОР.

Однак ефективність реалізації такого підходу залежить від того, наскільки ігровий компонент узгоджений зі структурою мультимедійного ресурсу, навчальними цілями та логікою подання змісту.

Тому варто зазначити, що інтеграція ЦНІ у мультимедійні ресурси навчального спрямування є складним багатоаспектним завданням, що потребує узгодження дидактичних цілей, структури ресурсу, змісту навчального матеріалу, сценарію ігрової взаємодії та програмної реалізації ігрової логіки. Особливої уваги потребують питання збереження цілісності освітнього простору МОР, розміщення ігрових елементів у логіці подання навчального матеріалу та включення результатів гри в загальну систему оцінювання навчальної діяльності користувача. У цьому контексті актуалізується потреба у визначенні методичних засад інтеграції цифрових ігор навчального спрямування у МОР, як їхніх повноцінних структурно-змістових компонентів, що забезпечують гармонійне поєднання ігрових механік з дидактичними цілями та структурою подання навчального матеріалу.

Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розроблення методичних засад інтеграції цифрових навчальних ігор у мультимедійні освітні ресурси.

Завдання дослідження:

- обґрунтувати педагогічну доцільність інтеграції ЦНІ у МОР;
- дослідити питання включення ігрових елементів до структури МОР;
- окреслити методичні підходи до інтеграції ЦНІ у структуру мультимедійних ресурсів;
- визначити вміст ключових навчально-розвиткових функцій ЦНІ;
- узагальнити послідовність етапів розроблення цифрової навчальної гри, як структурно-змістового елемента МОР;
- визначити вміст та особливості різновидів цифрових ігор, доцільних для реалізації в МОР, та навести приклади їх практичної реалізації.

Основна частина

Педагогічна доцільність інтеграції ЦНІ у МОР

Педагогічна доцільність використання ЦНІ насамперед зумовлюється їхньою здатністю підсилювати мотивацію до навчальної діяльності. Дослідження [5, 11, 12, 13] показують, що використання цифрових ігор в навчальному процесі сприяє підвищенню мотивації та залученості користувачів, підсилює їхнє задоволення від навчання, активізує пізнавальну діяльність і забезпечує ефективніше засвоєння матеріалу, що в результаті веде до покращення навчальних досягнень.

В освітньому контексті цифрова гра виконує не лише функцію зацікавлення, а сприяє активному засвоєнню навчального матеріалу через дію, вибір, порівняння, аналіз, пошук, повторення тощо, тобто через ті операції, які є суттєвими для формування знань і вмінь у процесі навчання/самонавчання користувачів. Наприклад, в статті [5] навчальні ігри розглядаються як ключовий елемент мультимедійного навчального комплексу, що підсилює педагогічну ефективність навчання програмуванню. Підкреслюється, що до структури мультимедійного комплексу включено три цифрові навчальні гри різних жанрів, серед яких пригодницькі та детективні. Вони виконують не лише розважальну, а й дидактичну функцію: допомагають здобувачам закріплювати знання, формувати навички застосування синтаксису та логіки мови C#, а також підтримують інтерес до навчального процесу. Ігрові сценарії створюють захоплююче середовище, у якому здобувачі мають змогу експериментувати, приймати рішення та бачити наслідки своїх дій, що сприяє розвитку критичного мислення, аналітичних та професійних здібностей. Важливим є те, що ЦНІ інтегровані у мультимедійний комплекс як структурні елементи поряд з теоретичним матеріалом, навчальними відеосимуляціями, інтерактивними вправами та тестами, забезпечуючи цілісність навчального простору. Такий підхід дає змогу не лише підвищити мотивацію, а й забезпечити цілісне поєднання теоретичного, практичного та контрольного компонентів навчання. Таким чином, ЦНІ у цьому мультимедійному ресурсі виступають педагогічно доцільним інструментом, який підвищує мотивацію, залученість і якість засвоєння основ програмування мовою C#.

Дослідження [11] підтверджує, що гейміфікація у вищій освіті через ігрове навчання підвищує мотивацію здобувачів та їхні когнітивні результати, сприяючи кращому розумінню матеріалу, засвоєнню знань, розвитку критичного мислення та активній участі в навчанні. Ці висновки підтверджують педагогічну доцільність інтеграції ЦНІ у мультимедійні ресурси, оскільки вони створюють умови не лише для мотивації, а і для розвитку когнітивних навичок у єдиному цифровому освітньому середовищі.

Позитивні результати впливу цифрових ігор на результати навчання користувачів, мотивацію, залученість та обізнаність у питаннях цифрового етикету та відповідальної поведінки в Інтернеті було отримано дослідниками в роботі [12]. У роботі [13] доведено, що ігрове навчання стимулює у користувачів самомотивацію, саморозвиток і прагнення до вдосконалення, що робить його важливим інструментом сучасної мультимедійної освіти. Це підтверджує, що ЦНІ у мультимедійних ресурсах створюють умови для формування автономного навчання.

Особливо важливим є те, що ігрові елементи можуть бути включені не зовні, а безпосередньо у структуру мультимедійного ресурсу, завдяки чому зберігається цілісність освітнього середовища, а результати проходження гри можуть інтегруватися в загальну систему оцінювання навчальної діяльності користувача. Такий підхід є більш педагогічно виправданим, ніж використання

окремих зовнішніх сервісів, оскільки він не розриває логіку подання матеріалу, не змушує користувача переходити на інші платформи і дозволяє органічно поєднувати гру з теоретичними, практичними та контрольними компонентами ресурсу. Так, у праці [10] ЦНІ розглядають як невід'ємні структурні елементи МОР та наводяться приклади їх реалізації в мультимедійних ресурсах різного предметного спрямування, як-от: важливі правила під час війни, основи дизайну, математика для 3 класу, програмування, гра на фортепіано тощо.

Важливою педагогічною перевагою ЦНІ є їхній потенціал до індивідуалізації навчання для забезпечення персоналізованого освітнього досвіду [14]. На основі досвіду, набутого під час ігрової взаємодії з навчальним матеріалом, відбувається формування індивідуального досвіду користувача за рахунок того, що «користувач робить ці дії самостійно, обмірковує та аналізує свій результат, і прагне зробити ліпше» [10, с. 60].

Цифрова гра дає змогу передбачити різний темп виконання, різну складність завдань, варіативність підказок, повторне проходження окремих етапів і диференційований зворотний зв'язок. У межах МОР це особливо важливо, оскільки дозволяє будувати індивідуальні траєкторії навчання відповідно до рівня підготовленості, навчальних потреб і когнітивних можливостей користувачів. Саме тому цифрову гру навчального спрямування доцільно розглядати як дидактично адаптований цифровий інструмент, який має бути узгоджений із змістом, структурою та цілями конкретного мультимедійного ресурсу.

Ще одним аргументом на користь педагогічної доцільності інтеграції цифрових ігор є їхній вплив на якість засвоєння навчального матеріалу. Так, навчання через гру сприяє більш глибокому розумінню, тривалішому запам'ятовуванню та кращому перенесенню знань у практичну діяльність. Це пояснюється тим, що у цифровій грі користувач не лише сприймає інформацію, а й оперує нею, приймає рішення, перевіряє їх наслідки, коригує власні дії та повторно повертається до проблемних фрагментів матеріалу. Такий механізм навчання особливо ефективний у мультимедійних ресурсах, де навчальний зміст може бути представлений у вигляді комбінації різних видів медіаконтенту, як-от тексту, зображень, відеосимуляцій тощо [15].

Окремо слід наголосити на тому, що ЦНІ створюють умови для формування не лише предметних знань, а і ширшого спектра компетентностей. У процесі виконання ігрових завдань розвиваються логічне та аналітичне мислення, увага, пам'ять, здатність до прогнозування, самоконтроль, наполегливість, здатність до самостійного прийняття рішень тощо. Саме тому в роботах [1, 8, 13, 16] цифрові ігри розглядаються як засіб не тільки навчального, а й розвивального впливу. Такий підхід узгоджується з сучасними уявленнями про цифрове навчання, у межах якого важливим є не просто засвоєння інформації, а формування готовності користувача діяти в ситуації вибору, аналізу та творчого застосування знань [10].

Педагогічна доцільність інтеграції ЦНІ у мультимедійні ресурси проявляється також у можливості підтримувати зворотний зв'язок і самоконтроль. Ігрові завдання, побудовані у форматі вибору, співставлення, пошуку, послідовності або розв'язання, дають змогу користувачу одразу бачити наслідки власних дій, повертатися до помилок і виправляти їх без втрати мотивації. У такому випадку цифрова гра виконує функцію не лише тренувальну, а й діагностичну, оскільки допомагає виявляти проблемні місця в засвоєнні навчального матеріалу. Власне тому ЦНІ доцільно вбудовувати в структуру МОР таким чином, щоб вони були логічно пов'язані з теорією, практичними завданнями та системою оцінювання результатів навчання.

Суттєвим є й те, що ЦНІ мають високий потенціал для застосування як у формальній освіті, так і в самостійному навчанні. У МОР вони можуть функціонувати як елемент підтримки аудиторної роботи, як інструмент для закріплення знань після опрацювання теми, або як засіб самостійного опанування навчального матеріалу у зручному темпі. Це особливо важливо для здобувачів, які навчаються у сферах, де потрібне поєднання теоретичних знань, практичних дій та оперативного реагування на зміну навчальної ситуації. Саме тому ігрові елементи в МОР мають розглядатися як засіб посилення автономії навчання та індивідуалізації освітнього процесу. Разом із тим педагогічний ефект ігрових компонентів проявляється лише за умови їх органічного включення до складу структури МОР і чіткого узгодження з освітніми цілями.

Отже, педагогічна доцільність інтеграції ЦНІ у МОР зумовлена їхньою здатністю підвищувати мотивацію, посилювати залученість, забезпечувати індивідуалізацію навчання, сприяти глибшому засвоєнню знань і формуванню як професійних, так і особистих компетентностей користувачів. У цьому контексті ЦНІ постають як один із важливих засобів реалізації сучасної мультимедійної освіти.

Разом з тим педагогічна доцільність інтеграції ЦНІ значною мірою залежить від якості їх проектування та місця в структурі МОР. Ігрові елементи мають не відволікати від навчального вмісту, а органічно доповнювати його, підсилюючи засвоєння матеріалу. Особливо ефективним є їх використання як структурних компонентів мультимедійного ресурсу, що функціонують у межах його єдиного освітнього простору, оскільки це дозволяє узгодити ігрову діяльність із метою та загальною логікою навчання [10, 17].

Дослідження питання включення ігрових елементів до структури МОР

В процесі обґрунтування доцільності включення цифрових ігор до структури МОР найчастіше використовувались компетентнісний та структурний підходи [18]. Розглянемо деякі з цікавих робіт з цього напрямі.

У дослідженні [19] запропоновано підхід до формування концептуальної основи створення мультимедійного комплексу освітнього простору дуальної освіти для освітніх програм спеціальності «Видавництво та поліграфія».

У межах цього підходу було визначено вимоги до структури та складу такого комплексу, а також виокремлено чотири категорії знань, що покладені в основу формування його контентного наповнення. Автором проаналізовано взаємозв'язок між дидактичними завданнями та відповідними категоріями знань, що дозволило обґрунтовано підібрати мультимедійні інтерактивні засоби для кожної з них. Зазначається, що такі засоби забезпечують повноцінне представлення знань предметної області та сприяють формуванню однієї або декількох компетентностей користувача. Серед запропонованих інструментів особливу увагу привертає «Імітаційна гра», яка віднесена до категорій «неформалізоване знання про діяльність та її результати» та «слабоформалізоване знання нормативне (операційне) знання». Це свідчить про її високий потенціал у формуванні компетентнісної складової, оскільки саме такі типи знань найбільш ефективно засвоюються через моделювання діяльності та ігрову взаємодію. Практичну реалізацію запропонованого підходу продемонстровано на прикладі мультимедійного навчального комплексу, інтегрованого до персональної навчальної системи, створеної в середовищі LMS Moodle для дисципліни «Мультимедійне видавництво».

У науковій праці [20] запропоновано методику створення мультимедійного навчального комплексу з інформатики для навчання школярів з порушеннями слуху. Реалізація етапів методики дозволяє здійснити визначення найдоцільніших структурних елементів для включення до складу мультимедійного комплексу. Авторами сформовано критеріальну базу для оцінювання елементів мультимедійного комплексу та обґрунтовано доцільність їх відбору для структури комплексу. За результатами оцінювання елемент «Учбові ігри (R₇)» із зваженим балом «0,13» було визначено як доцільний для відтворення у складі даного мультимедійного навчального комплексу.

У розділі монографії [8] розглянуто підходи до обґрунтування складу мультимедійного навчального видання «Теорія кольору», зокрема з позицій економіко-математичного аналізу доцільності включення окремих структурних компонентів. Особливу увагу приділено визначенню ролі інтерактивних елементів, серед яких важливе місце відведено ЦНІ. У межах запропонованої методики передбачено оцінювання структурних елементів мультимедійного видання з урахуванням їх внеску у формування ключових компетентностей. Такий підхід базується на використанні системи з десяти компетентностей, що дозволяє обґрунтовано визначити найбільш доцільні складові контенту. Результати аналізу показали, що інтерактивні елементи, зокрема навчальні ігри (як складові елементу E₃), мають високий потенціал у забезпеченні компетентнісно-орієнтованого навчання.

У цій роботі, також, наведено приклади реалізації інтерактивних навчальних міні-ігор, спрямованих на засвоєння матеріалу з дисципліни «Теорія кольору». До них належать [8, с. 145-146]: завдання на складання тематичного пазлу у вигляді колірного кола з урахуванням часових обмежень та автоматичною перевіркою правильності, вправи на встановлення відповідності

між кольорами та геометричними формами, а також ігрові активності, пов'язані з розміщення кольорових прямокутників на нотному стані у правильному співвідношенні до нот.

Безумовно, додавання ігрових активностей до мультимедійного навчального видання не є гарантією досягнення користувачем навчального ефекту. Для цього необхідно цілеспрямоване педагогічне проєктування із чітко визначеними дидактичними цілями в рамках ігрової взаємодії. Так, подані в даному розділі монографії ЦНІ дозволяють досягти таких дидактичних цілей: опанування законів змішування кольорів, формування навичок гармонійного поєднання кольору й форми та розвиток мультимодальної компетентності через вправи з нотним станом, що інтегрують просторове мислення з когнітивним і творчим розвитком (рис. 1).

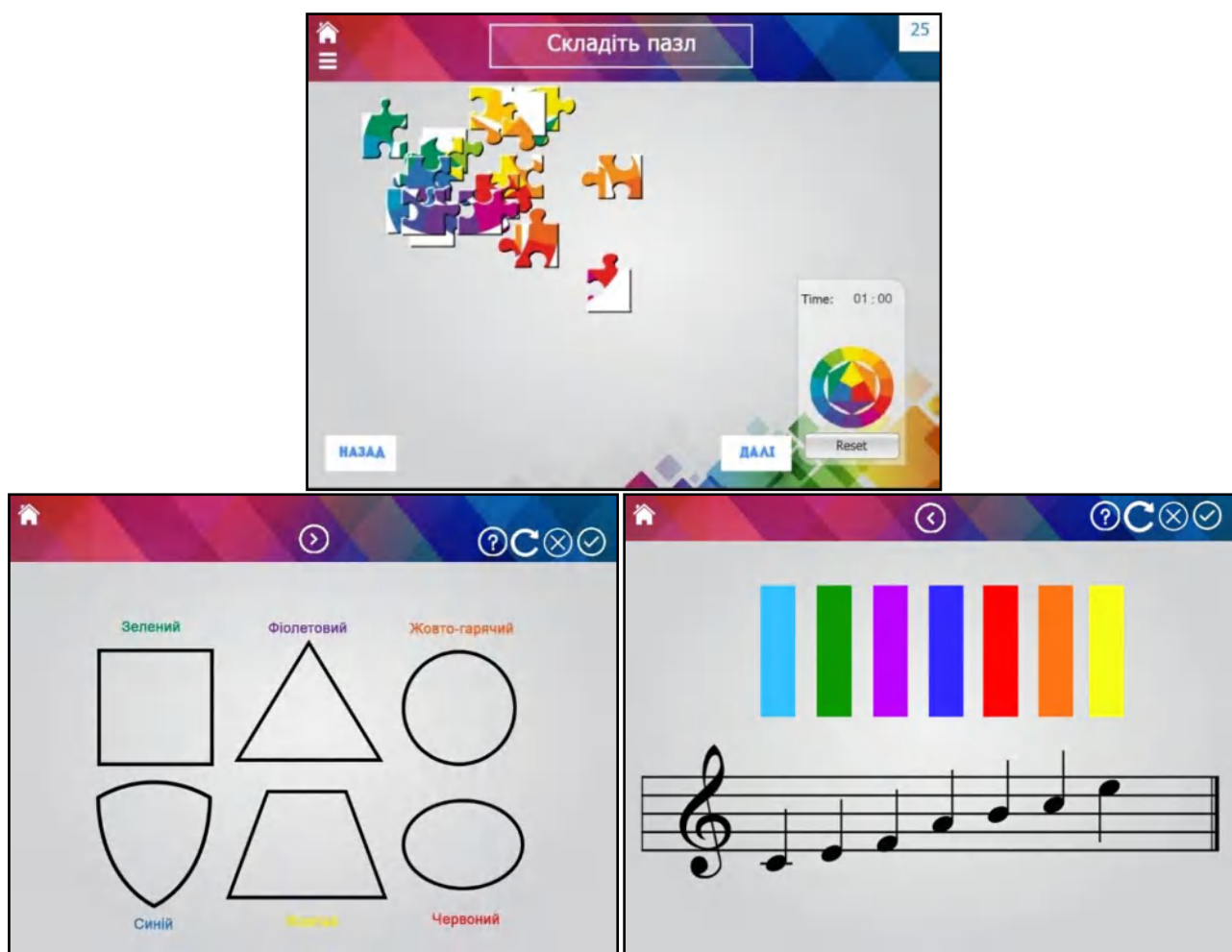


Рисунок 1 – Приклади реалізації інтерактивних ігор [8, с. 145-146]

Зазначені приклади демонструють можливість використання ЦНІ як ефективного педагогічно-доцільного інструменту для формування професійних знань і розвитку відповідних компетентностей у користувачів в просторі МОР.

У науковій праці [12] розглянуто особливості проєктування навчального курсу, спрямованого на формування цифрової грамотності, дотримання норм цифрового етикету та відповідальної поведінки користувачів у мережі Інтернет.

У межах розроблення курсу авторами значну увагу приділено впровадженню цифрових ігор як складової навчальних занять. При описі структури уроків було чітко визначено навчальні цілі та відповідні види діяльності, спрямовані на їх досягнення. Серед таких діяльностей передбачено використання ігрових сценаріїв, орієнтованих на моделювання реальних ситуацій онлайн-взаємодії. Зокрема, запропоновано ігрові активності, пов'язані з відпрацюванням правил цифрового етикету, взаємодією з користувачами різних соціальних груп, а також ознайомленням із нормами поведінки в мережі через сюжетно-орієнтовані завдання (як-от цифрова гра «An alien called «QI» learns about Earth»). Зазначені ігрові форми навчальної діяльності спрямовані на формування у користувачів компетентностей цифрового громадянства, зокрема усвідомлення відповідальності за власну поведінку в цифровому середовищі.

Автори даної роботи підкреслюють, що використання підходу навчання на основі цифрових ігор позитивно впливає на рівень засвоєння матеріалу, підвищує навчальну мотивацію та сприяє більш активному залученню користувачів до освітнього процесу.

У праці [1] обґрунтовано створення мультимедійного навчального курсу для саморозвитку користувача, присвяченого догляду за сукулентами, у структурі якого окремо передбачено елемент «Game». Його змістова реалізація здійснена у формі цифрової гри діалогового спілкування «Correspondence with a friend», що було інтегровано до курсу як структурно-змістовий компонент, а не як зовнішнє доповнення. Такий підхід демонструє, що ігровий елемент у мультимедійному курсі може виконувати не лише розважальну, а й навчально-консультативну функцію, забезпечуючи користувачеві можливість у доступній інтерактивній формі отримувати поради щодо правильного догляду за сукулентами. Отже, наведений приклад підтверджує доцільність включення навчальних ігор до структури МОР як засобу активізації взаємодії з навчальним матеріалом, посилення практичної спрямованості курсу та підвищення мотивації користувача до самонавчання з метою саморозвитку.

У науковій праці [21] запропоновано методика створення мультимедійного видання «Самовчитель гри на фортепіано» (початковий рівень) для дітей молодшого шкільного віку, що дає змогу розглядати її як приклад цілеспрямованого проєктування навчального ресурсу з урахуванням його структурної, дидактичної та інтерактивної складових. Запропонована методика передбачає послідовне виявлення структурних елементів видання на основі функцій, які має виконувати мультимедійний самовчитель, визначення системи критеріїв та їхньої пріоритетності, а також добір найвагоміших компонентів відповідно до встановлених вагових коефіцієнтів. Такий підхід засвідчує, що структура МОР має формуватися не довільно, а як результат педагогічно та функціонально обґрунтованого добору елементів, здатних забезпечити ефективне самостійне навчання, активізувати пізнавальну діяльність і підтримати стійку мотивацію учня. Особливо показовим є те, що серед найбільш значущих структурних елементів було визначено «Навчальні мініігри» –

коефіцієнт вагомості «0,16» та «Релаксаційний простір («хвилина відпочинку») – коефіцієнт вагомості «0,11» [21, с. 191], що підтверджує доцільність включення ігрових компонентів до складу мультимедійного навчального видання як засобів чергування навчальної та розвантажувальної діяльності, підтримання інтересу і посилення залученості користувача.

Результати, наведені в роботі [16], свідчать, що релаксаційний тематичний компонент, реалізований у структурі мультимедійного видання «Графічний дизайн», має не лише розвантажувально-ігрове, а й навчально-творче значення, оскільки представлений у вигляді вбудованого графічного редактора для дизайнера. Його реалізація надає користувачеві можливість виконувати графічні дії, імітуючи процес малювання на папері за допомогою звичних інструментів, зокрема різних кистей і геометричних примітивів, а також імпортувати й експортувати зображення. Доступ до цього компонента надається як бонус після опрацювання матеріалу першої глави мультимедійного видання та проходження тестування, що забезпечує послідовний і логічний зв'язок ігрово-творчої активності з навчальним контентом. Отже, зазначений релаксаційний компонент можна розглядати як елемент ігрового навчання, оскільки взаємодія з ним відбувається в інтерактивній формі, має бонусний характер доступу, пов'язується з попереднім опрацюванням навчального матеріалу та стимулює користувача до активної творчої діяльності в межах мультимедійного видання.

Таким чином, аналіз наведених праць засвідчує, що реалізація компетентнісного та структурного підходів у проектуванні МОР підтверджує педагогічну доцільність включення цифрових ігор до їхньої структури як важливих інтерактивних компонентів, спрямованих на активізацію навчально-пізнавальної діяльності та підвищення мотивації користувачів.

Однак, питання включення ігрових елементів до структури МОР пов'язане не лише з підвищенням рівня інтерактивності ресурсів, а і з переосмисленням самої ролі гри у цифровому навчальному просторі МОР. У сучасних дослідженнях ЦНІ дедалі частіше розглядаються не як лише певне доповнення до навчального контенту, а як повноцінні структурно-змістові компоненти мультимедійного ресурсу, здатні виконувати мотиваційну, тренувальну, розвивальну, діагностичну та контрольно-оцінювальну функції.

Аналіз наукових і практичних розробок [5, 10, 12, 18, 22, 23, 24] показує, що існує кілька підходів до осмислення місця ігрових елементів у мультимедійному ресурсі навчального спрямування. Так, цифрова гра може розглядатися як допоміжний засіб активізації уваги і підвищення мотивації, тобто як елемент, що супроводжує основний навчальний матеріал ресурсу. Може бути і інший підхід, коли цифрова гра буде виступати як один із провідних засобів опрацювання вмісту, коли засвоєння навчальної інформації відбувається безпосередньо через виконання ігрових дій, прийняття рішень, аналіз ситуацій, вибір відповідей, встановлення відповідностей, моделювання певних процесів тощо.

Важливим аспектом дослідження є також співвідношення між ігровими елементами та іншими структурними компонентами МОР. Якщо

мультимедійний ресурс проектується як цілісна система, то ЦНІ мають бути пов'язані з теоретичним блоком, практичними вправами, відеосимуляціями, тестами та засобами зворотного зв'язку. У такому разі цифрова гра перестає бути ізольованим компонентом і стає частиною загальної траєкторії навчання, у межах якої користувач сприймає матеріал, виконує навчальні дії, отримує миттєву реакцію системи та переходить до наступного етапу роботи.

У дослідженнях автора даного розділу, зокрема в [1, 5, 8, 10, 17, 18, 24] показано, що ЦНІ в структурі мультимедійного ресурсу доцільно розглядати саме як його компоненти, а не зовнішні додатки. Така позиція ґрунтується на тому, що вбудована гра забезпечує більш тісний зв'язок із навчальним змістом, підтримує єдину стилістику мультимедійного ресурсу, дозволяє керувати послідовністю проходження та, за потреби, враховувати результати ігрової діяльності у загальній системі оцінювання. Водночас у статті про аналіз реалізації цифрових ігор у МОР [18] відзначено, що спосіб включення гри до структури МОР визначається не лише дидактичними, а й технічними чинниками, зокрема можливостями обраного програмного середовища та доцільністю використання зовнішніх онлайн-сервісів.

Характер включення ігрових елементів залежить від концепції конкретного МОР. Так, у мультимедійних ресурсах, орієнтованих на поетапне опанування матеріалу, ігрові елементи доцільно розміщувати після окремих смислових блоків як засіб локального закріплення. У більш складних мультимедійних курсах і комплексах вони можуть об'єднувати кілька вивчених тем, відтворювати професійні або життєві ситуації, стимулювати прийняття рішень і виконувати функцію інтегрованого практичного тренажера.

Окремої уваги заслуговує питання методичної доцільності включення ігрових елементів саме в ті структурні частини МОР, де вони здатні посилювати навчальний ефект, а не відволікати від змісту. Це означає, що гра має з'являтися в ресурсі не випадково, а відповідно до логіки навчального сценарію: для первинної мотивації, пояснення, тренування, перевірки або узагальнення. Якщо ж ігровий компонент не пов'язаний зі змістом теми, не підтримує навчальну мету або не інтегрується в загальну структуру проходження ресурсу, він втрачає дидактичну цінність і перетворюється лише на розважальний елемент.

Таким чином, дослідження питання включення ігрових елементів до структури мультимедійних ресурсів дає підстави стверджувати, що ефективність цифрової гри в освітньому середовищі визначається не самим фактом її наявності, а характером її структурної, змістової та функціональної інтеграції. Саме тому при проектуванні МОР цифрові ігри доцільно розглядати як компоненти єдиного освітнього простору, місце, форма і спосіб реалізації яких мають бути узгоджені з навчальними цілями, логікою подання матеріалу та загальною архітектурою ресурсу.

Методичні підходи до інтеграції ЦНІ у структуру мультимедійних ресурсів

У даному дослідженні увага зосереджується на ЦНІ, що реалізуються в цілісній структурі МОР, як вбудовані або власні навчальні ігрові активності. Специфіка МОР полягає в поєднанні різних видів контенту та способів взаємодії в єдиному цифровому просторі, де ігрові елементи можуть виступати як окремі інтерактивні блоки чи складові тематичних фрагментів, виконуючи функції закріплення матеріалу або підсумкового контролю. Тому дослідження їх включення до структури МОР варто здійснювати не лише з огляду на технологічну реалізацію, а передусім з позицій функціонального призначення у загальній логіці навчального процесу.

З погляду структурної організації МОР ігрові елементи можуть інтегруватися на різних рівнях: на макрорівні – як самостійні тематичні модулі чи розділи для узагальнення, повторення або підсумкового контролю; на мікрорівні – як локальні інтерактивні вставки на окремих сторінках чи екранах, що виконують функції ілюстрації, тренування, закріплення матеріалу або активізації уваги користувача. У такому випадку цифрова навчальна гра стає інструментом опрацювання конкретних фрагментів матеріалу, забезпечуючи природне включення користувача в навчальну діяльність за рахунок невідкладного обігравання матеріалу у невимушеній ігровій формі.

Інтеграція ЦНІ у структуру МОР може здійснюватися різними способами залежно від цілей навчання, технічних можливостей середовища розробки та загальної концепції побудови такого ресурсу. Можна зазначити, що на практиці не існує конкретного універсального підходу, оскільки характер включення ігрових активностей до МОР визначається багатьма чинниками: побажання замовника (наприклад, в брифі [25]), вимоги технічного завдання [26], вміст навчального матеріалу, потрібний рівень інтерактивності, можливості програмних засобів, які планується використовувати для створення ЦНІ тощо.

Одним із найбільш поширених методичних підходів є використання інтерактивних програмних модулів [10, 18, 27], створених за допомогою сторонніх (зовнішніх) онлайн-сервісів, як-от H5P, WordWall, Genially, LearningApps тощо. Ці онлайн-сервіси надають можливість для швидкого створення різного виду типових ігрових завдань, як-от: вікторини, флеш-картки, кросворди, анаграми, інтерактивні вправи на перетягування, вгадування, пам'ять тощо. Такі онлайн-сервіси надають готові шаблони, що значно спрощує процес розроблення та дозволяє зосередитися на змістовому наповненні завдань. У такому випадку ігрові модулі розробляються поза межами мультимедійного ресурсу, після чого можуть бути інтегровані в структуру МОР шляхом вбудовування або використання гіперпосилань, забезпечуючи додатковий рівень інтерактивності.

У випадку наявності можливості вбудування коду (як-от в програмному середовищі Adobe Captivate за рахунок наявності «Embed Code» у медіа блоку «Web Object») можна відтворити інтерактивний модуль, створений засобами зовнішнього онлайн-сервісу, на сторінці мультимедійного ресурсу, як вбудовану

ігрову активність. Приклад цифрової гри, що створена засобами WordWall та вмонтована за допомогою коду до сторінки мультимедійного ресурсу, реалізованого засобами Adobe Captivate, наведено на рис. 2.

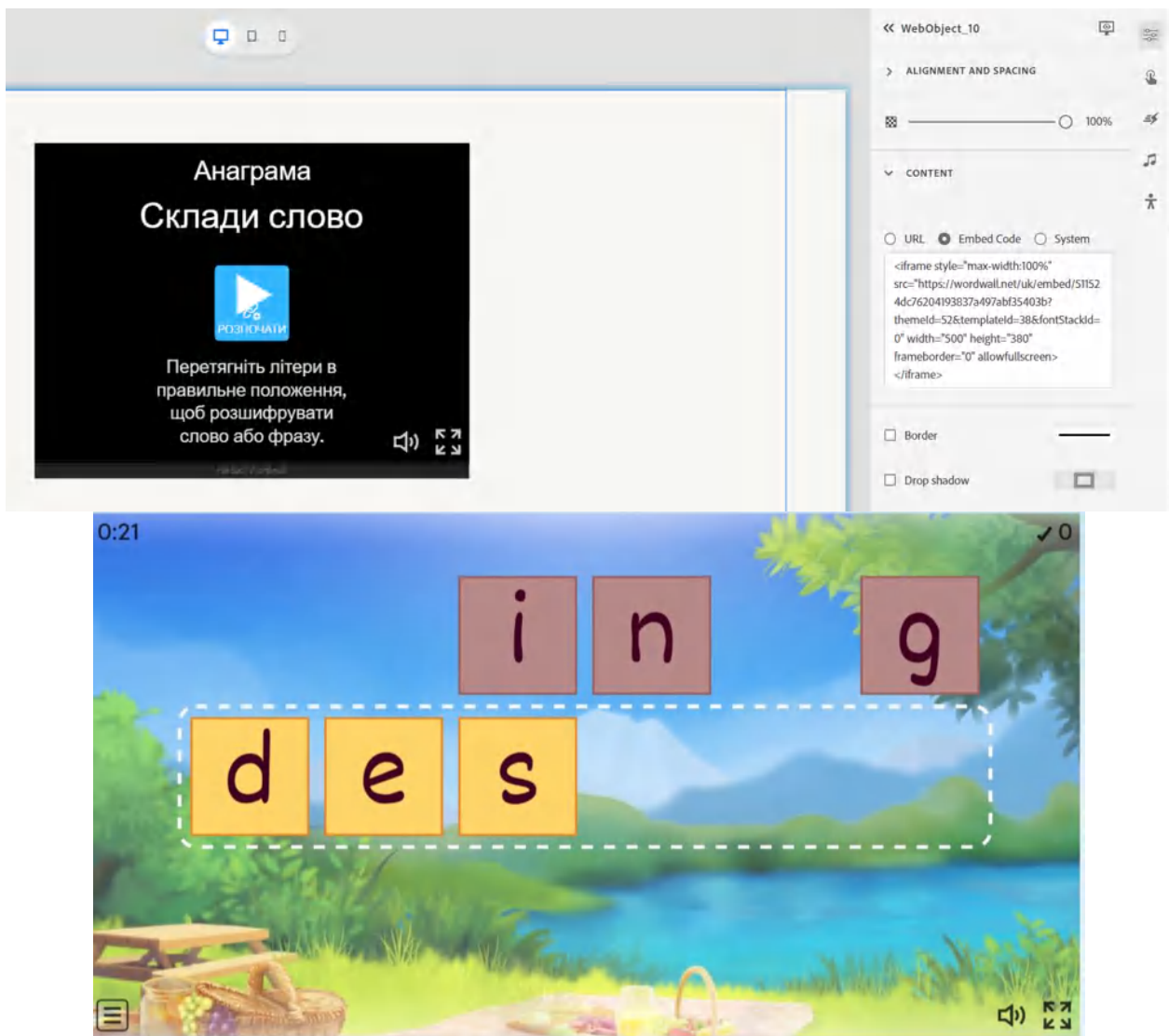


Рисунок 2 – Приклади вбудовання цифрової гри до структури МОР за допомогою коду

Підхід є відносно простим у реалізації та не потребує глибоких технічних навичок, що робить його доступним для широкого кола розробників (не потребуючи залучення, наприклад, програміста для здійснення інтеграції створеного ігрового модуля до структури МОР). Водночас він має певні обмеження, зокрема пов'язані зі складністю інтеграції результатів ігрової діяльності в загальну систему оцінювання МОР. Так, якщо за вірне проходження вбудованих до освітнього простору інтерактивних програмних модулів передбачено нарахування балів, то вони не будуть автоматично додані до загального накопиченого балу за виконання всіх інтерактивних завдань, вправ, симуляцій тощо, реалізованих в межах єдиного навчального простору МОР. Щоб врахувати бали, отримані користувачем під час проходження вбудованої гри, може виникнути потреба у додатковому залученні програміста для забезпечення

інтеграції цих результатів із загальною системою накопичення балів за всі інтерактивності МОР. Таке залучення спричиняє додаткові фінансові витрати, що, у свою чергу, може призвести до рішення про нерентабельність створення подібного мультимедійного ресурсу.

Іншим, більш комплексним методичним підходом є створення власних ЦНІ безпосередньо в середовищі розробки мультимедійного ресурсу [5, 10, 18]. У цьому випадку ігрові елементи виступають як органічна частина структури МОР та функціонують у межах єдиної логіки навчального процесу. Такий підхід дозволяє забезпечити узгодженість усіх інтерактивних компонентів, інтегрувати результати виконання ігрових завдань у загальну систему оцінювання та реалізувати більш складні сценарії взаємодії з користувачем. У такому разі створення і налаштування властивостей здійснюється безпосередньо засобами середовища, в якому розробляється ресурс, а отримані користувачем результати додаються до загальної системи накопичення балів за виконання інтерактивних завдань, вправ, відеосимуляцій та тестів. Це забезпечує єдність освітнього простору та дозволяє враховувати бали за проходження ЦНІ у сукупному прогресі користувача і загальному підсумку, що може бути використано для видачі сертифікату по закінченню навчання.

Важливою перевагою реалізації власних ігрових активностей є можливість гнучкого керування логікою навчально-ігрового процесу. Зокрема, доступ до ЦНІ може бути обумовлений попереднім опрацюванням навчального матеріалу або успішним виконанням контрольних завдань. Це дозволяє органічно вписати ігрову діяльність у структуру мультимедійного ресурсу, зробивши її не випадковим елементом, а логічним продовженням навчального процесу. Крім того, ігрові сценарії можуть передбачати різні варіанти розвитку подій залежно від дій користувача, що сприяє підвищенню рівня індивідуалізації навчання.

Не менш важливим є те, що власні ігрові активності дозволяють реалізувати більш складні інтерактивні механіки, зокрема використання системи змінних, умовних переходів і багаторівневої структури завдань. Це відкриває можливості для створення адаптивних сценаріїв, у межах яких користувач отримує різний досвід взаємодії залежно від рівня підготовки, кількості спроб або досягнутих результатів. Такий підхід сприяє не лише кращому засвоєнню матеріалу, а й формуванню навичок самоконтролю та саморегуляції.

Варто зазначити, що саме власні ігрові активності найчастіше використовуються для моделювання професійних ситуацій, організації багаторівневих ігрових сценаріїв та підсумкового контролю знань.

Разом із тим реалізація ЦНІ як власних елементів МОР потребує більш ретельного опрацювання як з методичної, так і з технічної точки зору.

Розробнику необхідно враховувати не лише зміст навчального матеріалу, а й логіку ігрової взаємодії, принципи гейміфікації, особливості сприйняття інформації користувачем. Важливо забезпечити баланс між ігровою та навчальною складовими, щоб ігровий процес не відволікав від досягнення освітніх цілей, а, навпаки, підсилював їх.

Таким чином, використання ЦНІ як власних ігрових активностей МОР є одним із найбільш ефективних методичних підходів до їх інтеграції. Це забезпечує цілісність освітнього простору, узгодженість усіх його компонентів та створює передумови для більш глибокої та осмисленої взаємодії користувача з навчальним матеріалом.

Як приклад практичної реалізації цього методичного підходу доречно зазначити працю авторів Khoroshevska I., Filipchuk A., Khoroshevskiy O. «Key features in developing the «C# Quick Learning» multimedia training complex» [5]. В ній ЦНІ реалізовані як власні ігрові активності в структурі мультимедійного комплексу для навчання користувачів програмуванню мовою C#. Мультимедійний комплекс з його ігровою складовою реалізовано засобами програмного середовища Adobe Captivate. На рис. 3 подано приклад реалізації гри пригодницького жанру, в якій користувач подорожує за локаціями до невідомого острова зі скарбами. На пропонуваніх локаціях йому пропонується виконати різні за складністю інтерактивні ігрові завдання з програмування мовою C#.

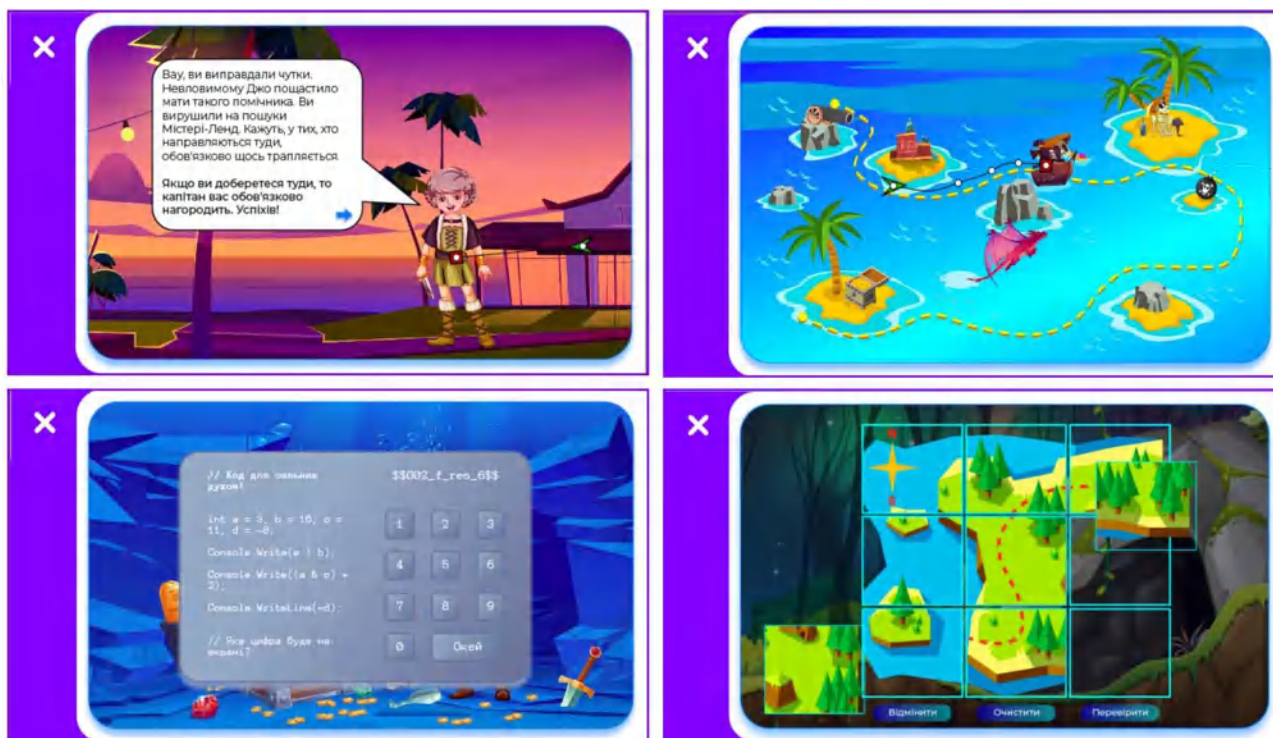


Рисунок 3 – Приклад-фрагмент реалізації навчальної гри пригодницького жанру «Mystery Land», як власного елемента мультимедійного навчального комплексу [5, с. 210]

На рис. 4 наведено приклад реалізації однієї з цифрових навчальних ігор детективного жанру під назвою «New York Mysteries», як власного елемента мультимедійного комплексу. Під час створення інтерактивних ігрових завдань у різних локаціях сюжетної лінії, пов'язаної з пошуком зниклого персонажа, основний акцент зроблено на опрацюванні фрагментів програмного коду, де користувач має надати правильні відповіді.

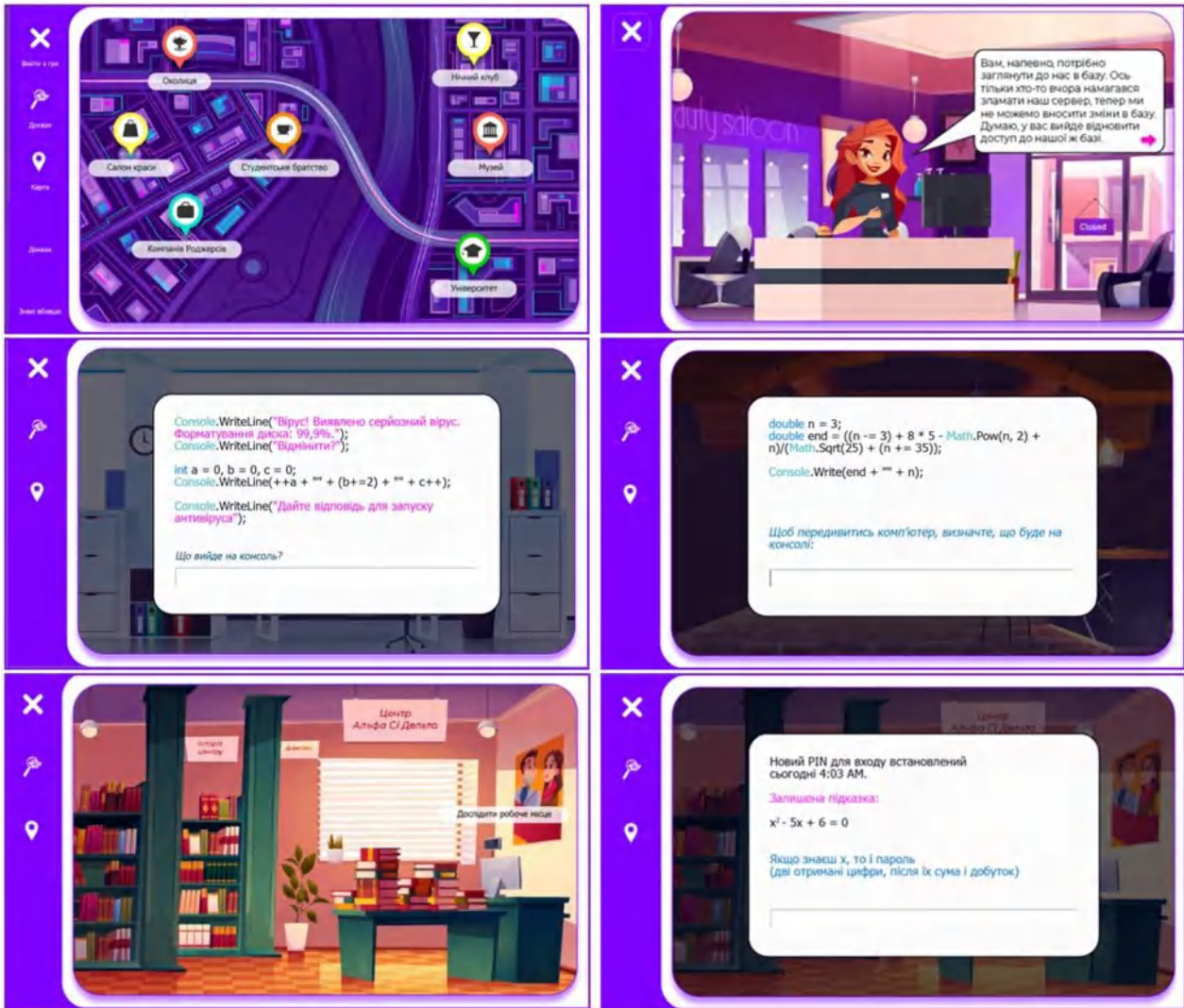


Рисунок 4 – Приклад-фрагмент реалізації навчальної гри детективного жанру «New York Mysteries», як власного елемента мультимедійного навчального комплексу [5, с. 211]

Окремий інтерес у контексті проектування МОР становить гібридний методичний підхід до інтеграції ЦНІ, який передбачає одночасне використання як зовнішніх інтерактивних програмних модулів, створених за допомогою сторонніх онлайн-сервісів, так і власних ігрових активностей, реалізованих безпосередньо в середовищі розробки мультимедійного ресурсу. Такий методичний підхід дозволяє поєднати переваги обох способів інтеграції та більш гнучко організувати навчальний процес.

Це дозволяє раціонально розподілити функціональне навантаження між різними цифровими іграми в МОР. Інтерактивні програмні модулі можуть використовуватися як допоміжні інструменти для закріплення окремих фрагментів навчального матеріалу, тоді як власні ігрові активності – як ключові елементи, що забезпечують глибшу інтеграцію ігрового навчання в освітній процес. Такий методичний підхід сприяє більш ефективному використанню ресурсів розробника, оскільки дозволяє поєднати швидке створення окремих тренувальних вправ із повною методичною та візуальною інтеграцією складніших ігрових сценаріїв у цілісну структуру МОР.

Разом із тим гібридний методичний підхід потребує особливої уваги до забезпечення цілісності освітнього простору. Оскільки якщо інтерактивні програмні модулі реалізовані як зовнішні ресурси, вони не завжди можуть інтегруватися в єдину систему формування ітогових результатів навчання. Отже виникає необхідність продуманої організації оцінювання або використання їх переважно як тренувальних елементів без жорсткої прив'язки до підсумкового балу. У свою чергу, власні ігрові активності можуть виступати основою для формування підсумкових результатів навчання.

Таким чином, гібридний методичний підхід до інтеграції ЦНІ є доцільним у випадках, коли необхідно забезпечити баланс між швидкістю розроблення, різноманітністю інтерактивних завдань та глибиною опрацювання навчального матеріалу. Його використання дозволяє створювати більш гнучкі та функціонально насичені МОР, у межах яких ігрові елементи виконують як допоміжну, так і системоутворюючу роль у навчальному процесі.

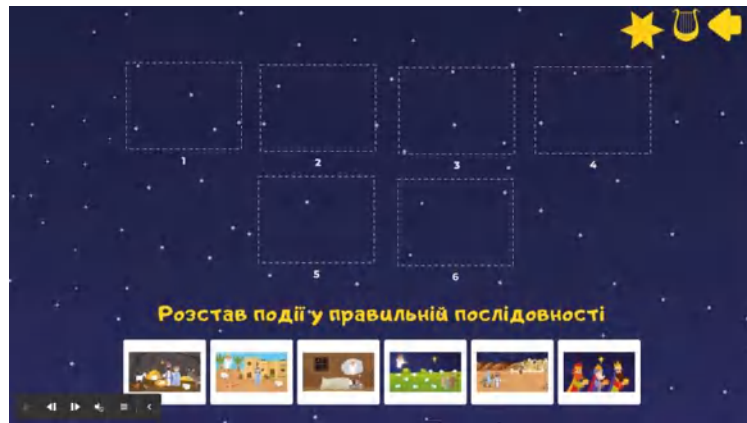
Як приклад реалізації гібридного підходу можна навести статтю авторів Хорошевська І. О., Бутенко К. В. «Інтерактивне мультимедійне видання «Різдвяна історія» як засіб ігрового навчання у дитячій релігійній освіті» [28], у якій створено гнучкий навчальний простір з трьома ЦНІ (рис. 5):

– перша інтерактивна гра «Вірна послідовність» створена у середовищі Adobe Captivate із використанням ігрової механіки Drag and Drop як вбудований елемент інтерактивного мультимедійного видання навчального спрямування «Різдвяна історія», реалізованого засобами Adobe Captivate;

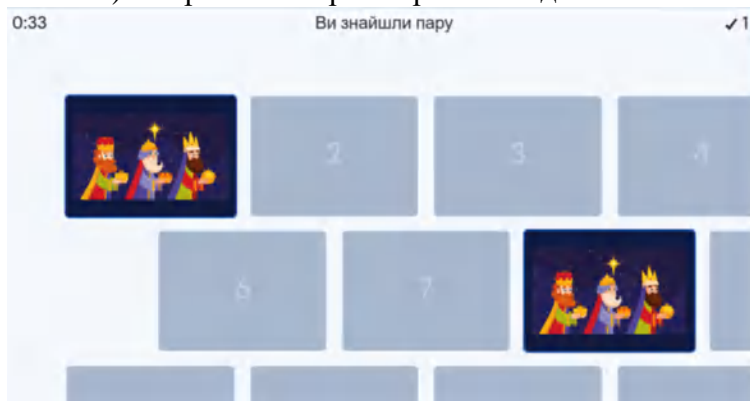
– друга інтерактивна гра «Смислові пари» створена засобами онлайн-сервісу Wordwall та інтегрована в мультимедійне видання, як елемент його навчального простору;

– третя інтерактивна гра «Цікаві факти про Різдво» створена на онлайн-платформі Genially із використанням шаблону Pixel Challenge. Вона поєднує навчання та розвагу, пропонуючи користувачам 10 тверджень про різдвяні традиції і біблійні події у форматі запитань із двома варіантами відповіді. Поступове відкривання піксельованої картинки, миттєвий зворотний зв'язок та візуально-звукові ефекти підтримують інтерес, розвивають критичне мислення та допомагають закріпити знання. Доступ до гри надається через кнопку з інструкцією, розташовану на слайді мультимедійного видання. Кнопка містить згенероване після публікації посилання на онлайн-платформу Genially, що забезпечує перехід до інтерактивного контенту.

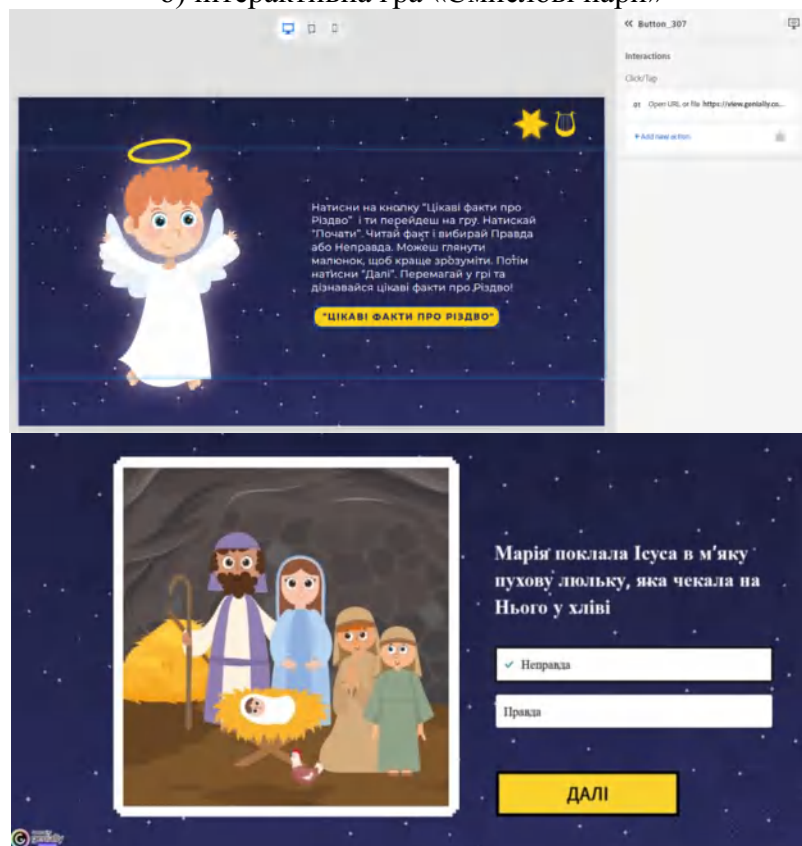
Однак варто зазначити, що незалежно від того, чи застосовуються інтерактивні програмні модулі, чи ЦНІ створюються безпосередньо засобами програмного забезпечення, у якому розробляється навчальний мультимедійний ресурс, або використовується гібридний методичний підхід, головним залишається те, що ігрове навчання забезпечує високий рівень інтерактивної взаємодії з користувачем. Це, у свою чергу, сприяє глибшому розумінню навчального матеріалу та ефективнішому його засвоєнню.



а) інтерактивна гра «Вірна послідовність»



б) інтерактивна гра «Смислові пари»



в) інтерактивна гра «Цікаві факти про Різдво»

Рисунок 5 – Приклад реалізації гібридного методичного підходу на основі створення трьох ЦНІ у просторі інтерактивного мультимедійного видання «Різдвяна історія» [28, с. 393-394]

Вміст ключових навчально-розвиткових функцій ЦНІ

Усі підходи до реалізації ЦНІ мають спільну мету – формування у користувачів МОР навчально-розвиткових функцій. У дослідженні [10] визначено такі ключові функції, розглянемо їх вміст:

– розвиток логічного мислення: забезпечується через виконання ігрових дій, що передбачають упорядкування, співставлення, класифікацію, встановлення відповідностей та пошук об'єктів за визначеними умовами. У межах таких ЦНІ користувач має аналізувати запропоновані варіанти, встановлювати причинно-наслідкові зв'язки, визначати закономірності та обирати правильні рішення. Виконання подібних ігрових завдань сприяє формуванню вмінь працювати з інформацією структуровано, послідовно та обґрунтовано, що є важливою складовою навчальної діяльності;

– розвиток системно-просторового мислення: реалізується через ігрові завдання, пов'язані з аналізом цілісних об'єктів, їх складових частин та взаємного розташування. Користувач навчається сприймати об'єкти як елементи певної системи, розуміти їх взаємозв'язки та просторові характеристики. Особливу роль відіграють завдання на конструювання, моделювання, складання структур або орієнтацію в просторі, що сприяють розвитку уяви та здатності працювати з абстрактними образами;

– розвиток стратегічного мислення: передбачає формування здатності планувати власні дії, прогнозувати їх результати та обирати оптимальні шляхи досягнення мети. У процесі цифрової навчальної гри користувач має будувати послідовність дій, враховувати можливі варіанти розвитку подій і коригувати свою поведінку залежно від ситуації. Це сприяє розвитку навичок довгострокового планування, прийняття рішень у змінних умовах та формування індивідуальних стратегій проходження гри;

– розвиток аналітичного мислення: формується через необхідність опрацювання інформації з урахуванням різних умов, обмежень і вихідних даних. Ігрові завдання можуть включати розрахунки, аналіз ситуацій, вибір оптимальних рішень або проектування певних дій. У таких умовах користувач не лише сприймає інформацію, а й активно її аналізує, порівнює альтернативи, оцінює наслідки та обґрунтовує свої рішення. Це сприяє розвитку здатності до глибокого осмислення навчального матеріалу;

– розвиток творчого мислення: реалізується через надання користувачу можливості діяти без жорстко заданих критеріїв правильності. У таких ЦНІ акцент робиться на процесі створення, а не на результаті, що дозволяє проявити індивідуальність, уяву та креативність. Це можуть бути ігрові завдання на створення об'єктів, малювання, моделювання або генерацію ідей. Відсутність суворого оцінювання сприяє зниженню психологічного бар'єру та стимулює експериментування;

– розвиток комунікативного мислення та соціалізації: реалізується через ігрові сценарії, що передбачають взаємодію між користувачами або імітацію соціальних ситуацій. Симуляції дозволяють відтворювати реальні або наближені

до реальних умови комунікації, у яких користувач має приймати рішення, враховуючи поведінку інших учасників. Це сприяє розвитку навичок спілкування, співпраці, аргументації та соціальної адаптації.

Важливо зазначити, що ефективна реалізація наведених функцій можлива лише за умови створення сприятливого ігрового середовища. Йдеться про формування такої атмосфери, яка не нав'язує навчання, а природно залучає до нього, викликає інтерес і бажання продовжувати взаємодію з мультимедійним ресурсом. Саме в такому МОР користувач має змогу не лише засвоювати новий навчальний матеріал, а й осмислювати його через ігрову діяльність, що значно підвищує результативність навчального процесу.

Узагальнена послідовність етапів розроблення цифрової навчальної гри, як структурно-змістового елемента МОР

Наведемо узагальнену послідовність етапів, яка може бути використана під час розроблення цифрової навчальної гри як складника МОР. Запропонована послідовність орієнтована на забезпечення логічної інтеграції ігрового компонента у структуру МОР, збереження цілісності навчального середовища та підтримку педагогічного сценарію взаємодії користувача з медіаконтентом.

Першим етапом є визначення місця розташування цифрової гри в структурі МОР. Гра може бути реалізована як окремий структурний компонент МОР, доступний, наприклад, через головне меню, або як інтегрований елемент, розміщений після викладу певного фрагмента навчального матеріалу на поточній чи окремій сторінці. При цьому доцільним є забезпечення функціонування гри без переходу користувача на зовнішні ресурси чи ігрові платформи, оскільки в умовах цілісно спроектованого МОР вихід за межі його інтерфейсу може порушувати єдність навчального середовища. Додатково це дозволяє реалізувати механізми накопичення результатів проходження гри, наприклад, додавання отриманих користувачем балів до загальної системи оцінювання за проходження навчального матеріалу, виконання інтерактивних вправ, завдань у відеосимуляціях, тестів.

Наступним етапом є формування концепції цифрової гри та визначення її різновиду. Вибір різновиду гри має здійснюватися з урахуванням дидактичної мети, змісту навчального матеріалу та очікуваних результатів навчання. Саме різновид гри визначає загальну логіку взаємодії користувача з контентом, характер ігрових дій та спосіб досягнення результату. Залежно від поставлених навчальних цілей гра може бути спрямована на співставлення об'єктів, пошук елементів за певними ознаками, упорядкування, прийняття рішень, побудову стратегій, комунікацію у просторі мультимедійного ресурсу тощо. Таким чином, різновид гри виступає основою її концептуальної та функціональної побудови.

Після цього необхідно визначити основні характеристики гри, зокрема її назву, мету, призначення, завдання та правила взаємодії користувача з ігровим середовищем. За потреби також окреслюються можливі обмеження, умови доступу або допущення, які регламентують процес проходження гри.

Важливим етапом є вибір форми побудови сценарію гри та його подальше розроблення. Сценарій може бути реалізований у словесній, графічній або комбінованій формі. Він визначає логіку розвитку подій, послідовність дій користувача, механізми взаємодії та умови завершення гри. При цьому сценарій доцільно будувати з урахуванням послідовності переходів між етапами гри, механізмів зворотного зв'язку та способів фіксації результатів діяльності користувача. Наявність сценарію дозволяє забезпечити структурованість і послідовність реалізації ігрового процесу.

Окрему увагу необхідно приділити опису всіх об'єктів і процесів, що використовуватимуться у грі. Навчальна гра може базуватися на сукупності різних мультимедійних компонентів, серед яких інтерактивні елементи, графічні об'єкти, текстові блоки, відеофрагменти, аудіопідказки, анімаційні елементи тощо. Їх попередній опис дозволяє забезпечити узгодженість роботи всіх складників гри.

Наступним етапом є проєктування дизайну інтерфейсу гри та її окремих елементів. При цьому важливо забезпечити стилістичну та візуальну узгодженість гри із загальним оформленням МОР. Графічні об'єкти, кольорові рішення, позначення та способи візуалізації елементів повинні відповідати тому, як аналогічні об'єкти, процеси або явища подані у навчальному матеріалі МОР. Це сприяє формуванню цілісного користувацького середовища та полегшує сприйняття навчального контенту.

Після завершення етапу проєктування здійснюється безпосередня реалізація цифрової навчальної гри у вибраному середовищі розроблення. На цьому етапі виконується створення ігрових елементів, налаштування їх властивостей, параметрів та механізмів взаємодії між ними. За потреби додатково реалізуються скриптові конструкції, які забезпечують підтримку окремих функцій гри, наприклад, відображення бонусного контенту, запуск анімацій, зміну станів об'єктів або фіксацію результатів користувача.

Завершальними етапами є тестування цифрової навчальної гри та демонстрація результатів її роботи у структурі МОР. Тестування може охоплювати змістовий (відповідність навчальним цілям), функціональний (коректність роботи) та ергономічний (зручність інтерфейсу) аспекти, що дозволяє виявити помилки, недоліки інтерфейсу або проблеми взаємодії користувача з грою.

Після усунення виявлених недоліків здійснюється демонстрація функціонування цифрової навчальної гри в реальних умовах використання, зокрема перевірка сценаріїв успішного, частково успішного та повторного проходження, коректності нарахування балів, надання підказок, а також інтеграції результатів у загальну структуру МОР.

Вміст та особливості різновидів цифрових ігор, доцільних для реалізації в МОР

Спираючись на раніше отримані результати щодо реалізації цифрових навчальних ігор у структурі МОР [10, с. 61-62], доцільно виокремити такі різновиди: гра-співставлення; гра-відбір; гра-пошук; гра-рішення; гра-послідовність; гра-пазл; ігри-загадки, головоломки, квести, квізи, кросворди тощо; ігри із сюжетом певного жанру (детективні, гумористичні, пригодницькі тощо); гра-стратегія; творча гра; гра діалогового спілкування; ігри-тренажери та ігри-симулятори. Водночас в цій роботі було зауважено, що запропонована множина різновидів ЦНІ, доцільних для реалізації в рамках МОР, є відкритою сукупністю з можливістю їх уточнення, розширення та адаптації відповідно до специфіки предметної області створюваного мультимедійного ресурсу.

Розглянемо вміст та особливості запропонованих різновидів ЦНІ.

1. *Гра-співставлення* є різновидом ЦНІ, у яких основна діяльність користувача полягає у встановленні коректних логічних зв'язків між поданими об'єктами. Її сутність полягає у необхідності виконання дій з усіма елементами, представленими в межах ігрового поля, шляхом їх правильного співвіднесення відповідно до заданих умов або ознак. Такий тип цифрової гри передбачає активну взаємодію користувача з контентом через вибір, перетягування, поєднання або розміщення об'єктів у відповідних зонах.

Змістова основа гри може реалізовуватися у вигляді встановлення парних відповідностей (наприклад, термін – визначення, зображення – назва, елемент – функція) або у форматі класифікації, де користувач має згрупувати об'єкти за певними критеріями (категоріями, областями, шарами, рівнями, ознаками). У такому випадку кожен об'єкт повинен бути віднесений до визначеної області, що вимагає розуміння його властивостей та зв'язків з іншими елементами.

Важливою характеристикою гри-співставлення є те, що вона орієнтована на опрацювання повного набору представлених об'єктів, що забезпечує цілісне охоплення навчального матеріалу. Виконання завдання передбачає не часткову, а повну взаємодію з усіма елементами, що підвищує рівень залученості та сприяє кращому засвоєнню змісту.

З дидактичної точки зору, такий тип гри сприяє формуванню навичок аналізу, порівняння, узагальнення та класифікації. Користувач не просто відтворює інформацію, а встановлює логічні зв'язки між об'єктами, що активізує мислення та поглиблює розуміння навчального матеріалу.

У структурі МОР гра-співставлення може виконувати функцію закріплення знань, самоконтролю або проміжного оцінювання. Її використання є доцільним після подання теоретичного матеріалу, оскільки вона дозволяє перевірити правильність сформованих уявлень через практичну взаємодію з об'єктами.

Технічна реалізація гри-співставлення передбачає наявність інтерактивного ігрового поля, набору об'єктів і зон для їх розміщення, а також механізму перевірки правильності виконання (миттєвий зворотний зв'язок,

підсвічування, повідомлення про помилки або правильні дії). Це забезпечує керуваність навчального процесу та підтримує активну участь користувача.

2. **Гра-відбір** є різновидом ЦНІ, у яких основна діяльність користувача полягає у виборі обмеженої кількості об'єктів із запропонованої множини відповідно до заданих критеріїв. Її сутність полягає у здійсненні цілеспрямованого відбору елементів ігрового поля на основі попередньо визначеної умови, яка може бути сформульована у вигляді правила, ознаки або сукупності характеристик.

Ігрова взаємодія передбачає аналіз кожного представленого об'єкта з метою визначення його відповідності встановленим вимогам. Користувач здійснює вибір шляхом позначення, натискання або іншої форми інтерактивної дії, при цьому частина об'єктів виступає як правильні, а інші – як відволікаючі або помилкові варіанти. Це зумовлює необхідність не лише впізнавання, а й осмисленого прийняття рішення щодо доцільності включення об'єкта до вибірки.

Важливою особливістю такого різновиду ігор є наявність обмеження щодо кількості правильних відповідей або чітко визначеної умови завершення завдання. Це стимулює користувача до більш уважного опрацювання представленого матеріалу та знижує ймовірність випадкового вибору.

З дидактичної точки зору гра-відбір сприяє формуванню навичок розпізнавання, диференціації та узагальнення. Вона орієнтована на закріплення знань шляхом перевірки здатності користувача виділяти суттєві ознаки об'єктів і відмежовувати їх від несуттєвих або нерелевантних.

У структурі МОР гру-відбір доцільно використовувати як інструмент контролю або самоперевірки після опрацювання теоретичного матеріалу. Його застосування дозволяє оцінити рівень засвоєння знань через правильність прийнятих користувачем рішень у процесі відбору.

Технічна реалізація гри-відбору передбачає наявність ігрового поля з множиною об'єктів, механізмів їх вибору та системи зворотного зв'язку, що інформує користувача про правильність виконання завдання. Це може включати візуальні або текстові підказки, фіксацію кількості правильних відповідей та повідомлення про завершення гри.

3. **Гра-пошук** є різновидом ЦНІ, у яких провідною діяльністю користувача є виявлення об'єктів у межах ігрового поля відповідно до заданої умови. Її сутність полягає у знаходженні елементів, що відповідають визначеним ознакам, серед множини візуально або змістово подібних об'єктів.

Ігровий процес передбачає аналіз представленого середовища з метою ідентифікації необхідних об'єктів за певними характеристиками, такими як зовнішній вигляд, форма, розмір, колір або інші задані параметри. Користувач взаємодіє з елементами шляхом вибору або позначення знайдених об'єктів, що вимагає уважності, зосередженості та здатності до швидкого розпізнавання потрібних ознак.

Особливістю гри-пошуку є наявність відволікаючих елементів, які ускладнюють процес знаходження правильних об'єктів і стимулюють більш глибокий аналіз. Це сприяє активізації пізнавальної діяльності користувача та формує вміння виділяти суттєві характеристики серед другорядних.

З дидактичної точки зору, такий тип гри сприяє розвитку спостережливості, уваги до деталей, навичок порівняння та візуальної ідентифікації. Вона дозволяє закріпити знання через практичне застосування критеріїв відбору об'єктів у динамічному середовищі.

У структурі МОР гра-пошук може використовуватися як засіб закріплення матеріалу або як елемент активізації навчальної діяльності. Її доцільно застосовувати після ознайомлення з характеристиками об'єктів, процесів, певних явищ тощо оскільки вона перевіряє здатність користувача розпізнавати їх у різних контекстах.

Технічна реалізація гри-пошуку передбачає створення інтерактивного середовища з множиною об'єктів, механізмів їх вибору та системи зворотного зв'язку, що інформує про правильність знайдених елементів. Додатково можуть використовуватися часові обмеження або підрахунок кількості знайдених об'єктів, що підвищує динамічність ігрового процесу.

4. *Гра-рішення* є різновидом ЦНІ, у яких основна діяльність користувача спрямована на отримання правильної відповіді шляхом виконання певних інтелектуальних операцій. Її сутність полягає не у простому виборі або впізнаванні, а у необхідності здійснення логічних міркувань, розрахунків, проектувальних дій або інших форм обробки інформації для досягнення правильного результату.

Ігровий процес передбачає постановку перед користувачем задачі, для розв'язання якої необхідно проаналізувати вихідні дані, встановити взаємозв'язки між елементами та обрати або сформулювати обґрунтоване рішення. Взаємодія з контентом може реалізовуватися через введення відповіді, побудову певної структури, виконання послідовності дій або маніпулювання об'єктами відповідно до логіки завдання.

Особливістю гри-рішення є орієнтація на процес мислення, а не лише на кінцевий результат. Користувач залучається до активної когнітивної діяльності, що вимагає застосування знань, аналізу умов завдання та послідовного виконання необхідних операцій. Це унеможливує випадкове отримання правильної відповіді без розуміння змісту завдання.

З дидактичної точки зору такий тип гри сприяє розвитку логічного мислення, вміння аналізувати, синтезувати інформацію, здійснювати розрахунки та приймати обґрунтовані рішення. Вона орієнтована на поглиблене засвоєння навчального матеріалу через його активне застосування у процесі розв'язання завдання.

У структурі МОР гра-рішення доцільна як засіб контролю рівня засвоєння знань або як елемент формування практичних умінь. Її використання дозволяє

оцінити не лише правильність відповіді, а й здатність користувача застосовувати набуті знання та вміння у нових умовах.

Технічна реалізація гри-рішення передбачає наявність завдання, набору вихідних даних, інструментів для виконання необхідних дій та системи перевірки результату. Зворотний зв'язок може включати повідомлення про правильність відповіді, вказівки на помилки або підказки, що сприяє корекції дій користувача та підтримує навчальний процес.

5. Гра-послідовність є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на встановлення правильного порядку розташування об'єктів або дій відповідно до заданих умов. Її сутність полягає у впорядкуванні елементів ігрового поля таким чином, щоб відтворити логічно обґрунтовану або функціонально необхідну послідовність.

Ігровий процес передбачає аналіз представлених об'єктів з метою визначення їх взаємозв'язків та правильного місця в загальній структурі. Користувач здійснює дії з переміщення, сортування або розташування елементів у певному порядку, що може відображати етапи процесу, часову послідовність подій або ієрархічну організацію. Виконання завдання вимагає розуміння логіки зв'язків між елементами, а не лише їх окремих характеристик.

Особливістю гри-послідовності є орієнтація на встановлення цілісної структури з окремих складових, де правильність визначається не тільки вибором елементів, а й їх точним розташуванням відносно один одного. Це ускладнює завдання та підвищує рівень когнітивного навантаження, оскільки користувач має враховувати декілька взаємопов'язаних умов одночасно.

З дидактичної точки зору такий тип гри сприяє розвитку логічного мислення, уміння встановлювати причинно-наслідкові зв'язки, впорядковувати інформацію та відтворювати структуру процесів. Вона є ефективною для закріплення знань про послідовність дій, етапи виконання завдань або організацію складних систем.

У структурі МОР гра-послідовність може використовуватися як засіб формування та перевірки розуміння логіки процесів. Її доцільно застосовувати після подання навчального матеріалу, що описує певні етапи, алгоритми або структури, оскільки вона дозволяє перевірити здатність користувача правильно їх відтворювати.

Технічна реалізація гри-послідовності передбачає наявність набору об'єктів, які потрібно впорядкувати, інтерактивних механізмів їх переміщення, а також системи перевірки правильності встановленої послідовності. Зворотний зв'язок може включати індикацію помилок у розташуванні елементів або повідомлення про успішне виконання завдання, що сприяє корекції дій користувача та закріпленню навчального матеріалу.

6. Гра-пазл є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на відновлення цілісного зображення або конструкції шляхом поєднання окремих складових елементів. Її сутність полягає у необхідності правильного

складання цілісного об'єкта з фрагментів, які спочатку подаються у розрізненому або перемішаному вигляді.

Ігровий процес передбачає аналіз кожного елемента з метою визначення його місця у загальній структурі. Користувач здійснює дії з переміщення, поєднання або встановлення частин у відповідні позиції, орієнтуючись на форму, зміст, візуальні ознаки або логічні зв'язки між фрагментами. Це вимагає уважного порівняння деталей та розуміння цілісного образу, який необхідно відтворити.

Особливістю гри-пазла є орієнтація на реконструкцію цілісності з окремих частин, де правильність виконання завдання визначається точністю поєднання всіх елементів у єдину структуру. Таким чином, результат залежить від здатності користувача одночасно враховувати локальні характеристики окремих фрагментів і загальну конфігурацію об'єкта.

З дидактичної точки зору такий тип гри сприяє розвитку просторового мислення, уваги до деталей, аналітичних навичок та здатності до синтезу інформації. Вона ефективно використовується для закріплення матеріалу, що передбачає цілісне сприйняття об'єктів, структур або візуальних образів.

У структурі МОР гра-пазл може виконувати функцію закріплення знань або тренування навичок цілісного сприйняття інформації. Її доцільно застосовувати після ознайомлення з навчальним матеріалом, який передбачає роботу з комплексними об'єктами або зображеннями.

Технічна реалізація гри-пазлу передбачає поділ цілісного зображення або конструкції на окремі елементи, інтерактивні механізми їх переміщення та систему перевірки правильності складання. Зворотний зв'язок може включати автоматичне фіксування правильних поєднань або повідомлення про завершення складання цілісного об'єкта.

7. Ігри-загадки, головоломки, квести, квізи, кросворди тощо є різновидами ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на отримання правильної відповіді шляхом розв'язання пізнавальних завдань різного типу. Їх сутність полягає у необхідності відгадування, логічного аналізу, послідовного виконання дій або вибору правильних варіантів, що визначають подальший розвиток ігрового процесу або завершення завдання.

Ігрова взаємодія передбачає роботу з питаннями, підказками або умовами, на основі яких користувач повинен дійти до правильної відповіді. У випадку кросвордів або подібних форматів відповідь не лише формується, але й розміщується у спеціально визначених позиціях ігрового поля, що додає елемент структурованого заповнення простору. У квестах та головоломках результат окремих дій може впливати на подальший розвиток подій, формуючи послідовну логіку проходження завдання.

Особливістю цього різновиду ігор є поєднання різних когнітивних операцій – відгадування, логічного мислення, аналізу умов, встановлення зв'язків між елементами та прийняття рішень. Це забезпечує багаторівневу

взаємодію з навчальним матеріалом і підвищує його засвоєння через активну розумову діяльність.

З дидактичної точки зору такі ігри сприяють розвитку мислення, пам'яті, уважності, здатності до аналізу та узагальнення інформації. Вони також стимулюють самостійну пізнавальну активність, оскільки користувач повинен знаходити рішення без прямого відтворення готових відповідей.

У структурі МОР ігри-загадки, головоломки, квести, квізи та кросворди можуть виконувати функції закріплення знань, контролю засвоєння матеріалу або активізації навчальної діяльності. Їх застосування є доцільним як на етапі повторення, так і під час перевірки рівня опанування навчального матеріалу.

Технічна реалізація таких ігор передбачає інтерактивну систему завдань, механізми введення або вибору відповідей, а також спеціально організоване ігрове поле (зокрема, для кросвордів), де фіксуються результати виконання. Зворотний зв'язок може включати перевірку правильності відповідей, індикацію помилок або підтвердження успішного завершення завдання.

8. *Ігри із сюжетом певного жанру (детективні, гумористичні, пригодницькі тощо)* є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача організована через розвиток сюжетної лінії. Їх сутність полягає у включенні навчальних завдань у контекст послідовно розгорнутого сценарію, що відповідає обраному жанру та визначає загальну логіку проходження гри.

Ігровий процес передбачає взаємодію користувача з подіями, персонажами або ситуаціями, які формують сюжет. Виконання завдань, прийняття рішень або здійснення вибору впливають на подальший розвиток подій і можуть змінювати хід сценарію. Таким чином, навчальні дії інтегруються у сюжетну структуру та набувають контекстного значення.

Особливістю таких ігор є наявність сюжетної мотивації, яка визначає послідовність навчальних дій і підвищує зацікавленість користувача. Завдання подаються не ізольовано, а як частина загальної історії, що сприяє більш природному залученню до навчального процесу.

З дидактичної точки зору сюжетні ігри сприяють підвищенню мотивації до навчання, розвитку логічного мислення, навичок прийняття рішень та аналізу ситуацій. Вони забезпечують опосередковане засвоєння навчального матеріалу через включення його у змістову структуру сюжету.

У структурі МОР ігри із сюжетною складовою можуть виконувати функцію комплексного засвоєння матеріалу, поєднуючи елементи навчання та практичного застосування знань у змодельованих ситуаціях. Їх доцільно використовувати для підвищення залученості користувача та формування цілісного сприйняття навчального контенту.

Технічна реалізація таких ігор передбачає наявність сценарію з розгалуженнями, інтерактивних елементів взаємодії та системи фіксації вибору користувача, який впливає на розвиток сюжету. Це дозволяє реалізувати адаптивну структуру проходження залежно від прийнятих рішень.

9. *Гра-стратегія* є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на аналіз ситуації, планування дій та прийняття обґрунтованих рішень. Її сутність полягає у формуванні та реалізації певної стратегії поведінки, що визначає спосіб досягнення поставленої мети в межах ігрового середовища.

Ігровий процес передбачає оцінювання вихідних умов, визначення можливих варіантів дій та прогнозування їх наслідків. Користувач здійснює послідовне планування кроків, обирає оптимальні рішення та коригує власну стратегію залежно від розвитку ігрової ситуації. Це потребує системного мислення та здатності враховувати взаємозв'язки між різними елементами ігрового процесу.

Особливістю гри-стратегії є наявність багатоваріантності рішень і залежність результату від обраної тактики. Успішне виконання завдань не визначається одним правильним кроком, а формується як наслідок узгодженої системи дій, спрямованих на досягнення мети.

З дидактичної точки зору такі ігри сприяють розвитку аналітичного мислення, навичок планування, прогнозування та прийняття рішень. Вони формують уміння оцінювати ситуацію в комплексі та обирати найбільш доцільні способи досягнення результату.

У структурі МОР гра-стратегія може використовуватися як засіб розвитку управлінських та когнітивних навичок, а також як форма закріплення знань через моделювання ситуацій, що потребують прийняття рішень. Її застосування доцільне для формування цілісного розуміння взаємозв'язків у навчальному матеріалі.

Технічна реалізація гри-стратегії передбачає наявність сценарію з можливими варіантами розвитку подій, системи вибору дій користувача та механізмів оцінювання наслідків прийнятих рішень. Це забезпечує динамічну зміну ігрового середовища відповідно до обраної стратегії.

10. *Творча гра* є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на прояв індивідуальних творчих здібностей у межах визначеної предметної області. Її сутність полягає у створенні власного продукту або результату діяльності відповідно до тематичної спрямованості МОР.

Ігровий процес передбачає виконання завдань відкритого типу, які не мають єдиного правильного розв'язку та дозволяють користувачеві самостійно визначати способи реалізації поставленого завдання. Це може включати створення візуальних, текстових або комбінованих результатів, що відображають індивідуальне бачення користувача в межах заданої тематики.

Особливістю творчої гри є орієнтація на креативну діяльність, де результат формується на основі особистого вибору, уяви та інтерпретації навчального матеріалу. Відсутність жорстко фіксованого алгоритму виконання завдання забезпечує варіативність рішень і стимулює самостійність користувача.

З дидактичної точки зору такі ігри сприяють розвитку творчого мислення, уяви, здатності до самовираження та нестандартного підходу до вирішення

завдань. Вони також підтримують інтеграцію знань через їх практичне застосування у процесі створення власного результату.

У структурі МОР творча гра виконує функцію активізації пізнавальної діяльності та закріплення матеріалу через практичну реалізацію набутих знань. Її використання є доцільним у контексті тем, що передбачають відкриті завдання та можливість індивідуальної інтерпретації навчального змісту.

Технічна реалізація творчої гри передбачає наявність інструментів для створення та редагування результатів діяльності користувача, а також засобів збереження або демонстрації отриманого продукту. Це забезпечує можливість фіксації індивідуальних результатів навчальної діяльності.

11. Гра діалогового спілкування є різновидом ЦНІ, у яких діяльність користувача організована у формі віртуальної комунікації з інтерактивним співрозмовником. Її сутність полягає у моделюванні процесу спілкування, під час якого користувач взаємодіє з віртуальним персонажем шляхом обміну повідомленнями.

Ігровий процес передбачає формулювання користувачем запитань або звернень у форматі діалогу, на які віртуальний співрозмовник надає відповіді, пояснення або поради. Така взаємодія може реалізовуватися у вигляді текстового листування або інших форм діалогового обміну інформацією, що забезпечує імітацію реального спілкування.

Особливістю гри діалогового спілкування є створення умов для індивідуалізованої взаємодії, де зміст відповідей залежить від запитів користувача. Це дозволяє формувати відчуття персоналізованого навчального середовища та підвищує залученість до процесу взаємодії з контентом.

З дидактичної точки зору такі ігри сприяють розвитку комунікативних навичок, уміння формулювати запитання, аналізувати отриману інформацію та застосовувати її для вирішення навчальних завдань. Вони також підтримують процес опосередкованого засвоєння знань через діалогову взаємодію.

У структурі МОР гра діалогового спілкування може виконувати функцію підтримки навчального процесу, консультування користувача та закріплення матеріалу через інтерактивний обмін інформацією. Її доцільно використовувати як елемент супроводу навчання.

Технічна реалізація такої гри передбачає наявність інтерфейсу для введення повідомлень, системи обробки запитів та генерації відповідей віртуального співрозмовника, а також логіки діалогових сценаріїв. Це забезпечує послідовність та змістовність комунікації з користувачем.

12. Ігри-тренажери та ігри-симулятори є різновидами ЦНІ, у яких діяльність користувача спрямована на формування практичних навичок через віртуальну імітацію реальних або наближених до реальних процесів. Їх сутність полягає у відтворенні умов інтерактивної взаємодії з навчальними об'єктами / предметами, що дозволяє моделювати відповідні навчальні дії.

Ігровий процес передбачає виконання користувачем послідовності дій у змодельованому середовищі, яке відтворює логіку роботи з об'єктами певної

предметної області. Це може включати маніпуляції з елементами, відпрацювання операцій або проходження процедур, характерних для реальних умов діяльності, але реалізованих у віртуальному форматі.

Особливістю таких ігор є наближення навчального процесу до практичної діяльності, що забезпечується за рахунок імітації реальних сценаріїв взаємодії. Це дозволяє користувачеві без ризиків для реального середовища відпрацьовувати необхідні дії та формувати стійкі навички їх виконання.

З дидактичної точки зору ігри-тренажери та ігри-симулятори сприяють розвитку практичних умінь, закріпленню теоретичних знань через їх застосування, а також формуванню алгоритмів дій у типових та змодельованих ситуаціях. Вони забезпечують перехід від теоретичного засвоєння матеріалу до його практичного використання. У структурі МОР такі ігри виконують функцію практичного тренування та закріплення навичок. Їх використання є доцільним для підготовки користувача до реальної діяльності через багаторазове відпрацювання дій у контрольованому середовищі.

Технічна реалізація ігор-тренажерів та ігор-симуляторів передбачає створення інтерактивного віртуального середовища, що відтворює об'єкти та процеси предметної області, а також механізми взаємодії користувача з ними. Додатково можуть використовуватися системи оцінювання правильності виконання дій та зворотного зв'язку, що дозволяє коригувати процес навчання.

Результати досліджень

Важливість та особливості інтеграції ЦНІ в склад МОР розглядаються в рамках лекційного матеріалу освітньої компоненти «Технології електронного видавництва», що викладається здобувачам 4 курсу спеціальності «Видавництво та поліграфія» освітньої програми «Технології електронних мультимедійних видань» у Харківському національному економічному університеті імені Семена Кузнеця. В цій освітній компоненті реалізована і окрема лабораторна робота за темою «Розроблення навчальної гри як елемента мультимедійного навчального видання» [29, с. 55-62], яка дозволяє здобувачам одержати практичні навички зі створення сценарію та практичної реалізації тематичної цифрової навчальної гри, як навчально-релаксаційного елемента МОР певного предметного спрямування.

З метою апробації ідеї актуальності, доцільності та практичної реалізованості запропонованих різновидів ЦНІ в рамках навчальної дисципліни «Технології електронного видавництва» було проведено експеримент, метою якого було розроблення здобувачами 4 курсу спеціальності «Видавництво та поліграфія» багатокомпонентних цілісних МОР за обраними ними предметними областями, у складі яких повинна була бути передбачена реалізації однієї або декількох ЦНІ будь-якого з запропонованих різновидів.

Результати, що були отримані в рамках відтворення ідеї даного експерименту, надали можливість пересвідчитися, що всі запропоновані різновиди

ЦНІ не тільки спроможні мати а й мали практичну реалізацію в розроблених здобувачами МОР різного предметного спрямування (для професійного навчання або для саморозвитку користувачів). Авторські приклади реалізації розроблених здобувачами різновидів ЦНІ в складі МОР наведено у науковій праці [10, с. 62-67].

Розвиваючи ідею розроблення МОР з ігровими елементами, у співавторстві зі здобувачами та випускниками було створено ряд наукових статей [1, 5, 8, 24, 28]. Наприклад, у статті авторів Khoroshevska I., Zhovta O., Khoroshevskiy O. «Development of a multimedia educational resource «The World of Pysanka» [24] було запропоновано ігри-співставлення та гру-симулятор (дозволяє набути користувачу практичних навичок з фарбування писанки шляхом віртуальної імітації інтерактивної взаємодії з потрібними об'єктами).

Навчальні активності у вигляді ігор-співставлення сприяли закріпленню користувачами знань з символіки писанкарства. Приклад двох ігор-співставлення показано на рис. 6.

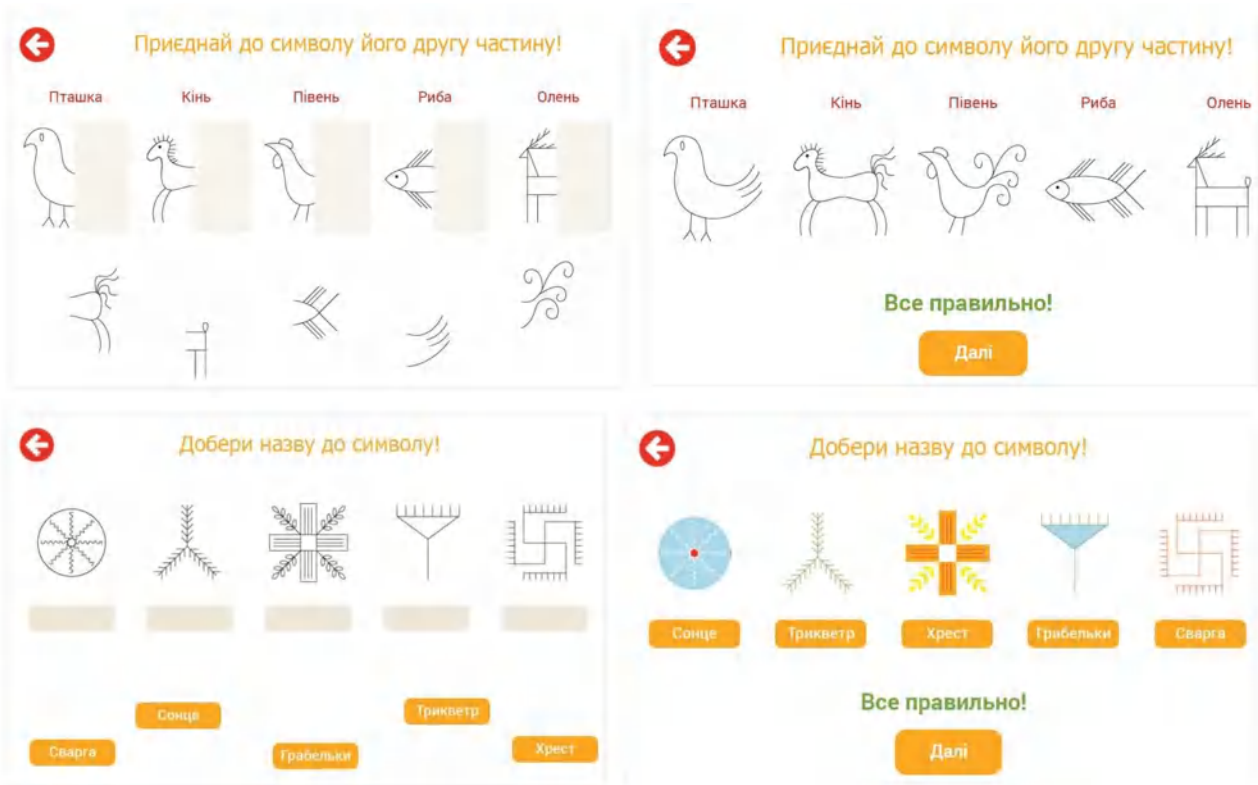


Рисунок 6 – Приклади реалізації цифрових навчальних ігор-співставлення, як елементів мультимедійного навчального ресурсу «The World of Pysanka» [24, с. 167]

В цих іграх користувачу треба шляхом перетягування:

– гра 1 – приєднати до першої частини зображення кожного символу його другу частину;

– гра 2 – здійснити вірне співставлення назви символу з його виглядом (в разі вірного співставлення символ стає кольоровим).

В статті авторів Khoroshevska I., Khoroshevskiy O., Hrabovskiy Y., Lukyanova V., Zhytlova I. «Development of a multimedia training course for user self-

development» було реалізовано гру діалогового спілкування [1]. Приклад реалізації одного зі сценаріїв гри діалогового спілкування користувача з віртуальним другом з питань догляду за сукулентами подано на рис. 7.

В цій грі закладено розгалуження відповідно до траєкторії відповідей користувача, наданих під час спілкування з віртуальним другом.

Деякі із розроблених здобувачами МОР з ігровими елементами було впроваджено до навчального процесу за спеціальністю «Видавництво та поліграфія» як допоміжні мультимедійні ресурси, які сприяють покращенню сприйняття й розуміння здобувачами складних аспектів навчального матеріалу за певними освітніми компонентами за рахунок наявності ЦНІ. Наприклад, таке впровадження мали мультимедійне навчальне видання «Теорія кольору» [8] в рамках освітньої компоненти «Теорія кольору»; мультимедійний навчальний комплекс «C# Quick Learning» [5] в рамках освітньої компоненти «Програмування засобів мультимедіа» й ін.

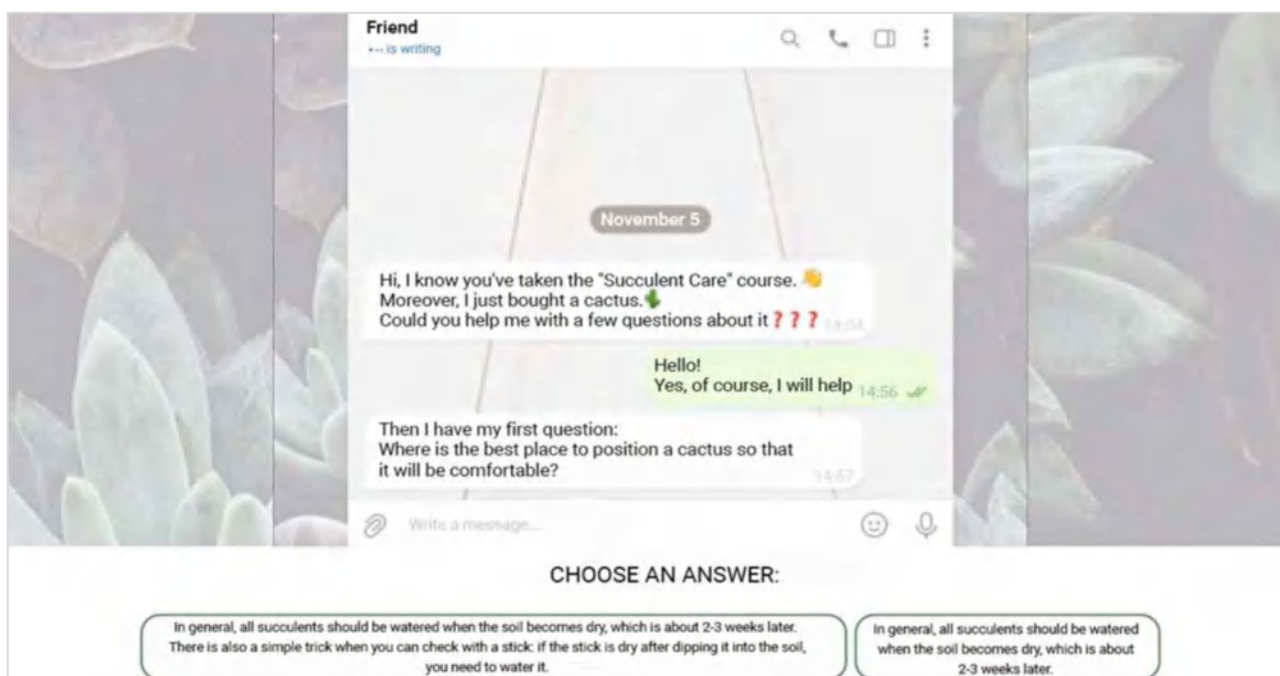


Рисунок 7 – Приклад реалізації цифрової навчальної гри діалогового спілкування, як елемента мультимедійного навчального курсу для саморозвитку користувача [1, с. 60]

Варто відмітити, що багато з розроблених здобувачами МОР викладено у вільний доступ з розміщенням посилань на них в персональній навчальній системі освітньої компоненти «Технології електронного видавництва» [30]. Це дозволяє не лише використовувати їх як приклади створення мультимедійних ресурсів навчального спрямування в межах освітньої компоненти «Технології електронного видавництва», а й працювати здобувачам з їхнім вмістом для опанування професійних питань або реалізації саморозвитку у сферах, що їх цікавлять (як-от писанкарство, правильний догляд за рослинами, медитація, гра на гітарі, кулінарія тощо).

Висновки

У результаті дослідження розроблено методичні засади інтеграції цифрових навчальних ігор у мультимедійні освітні ресурси. Обґрунтовано, що інтеграція ЦНІ у структуру МОР є педагогічно доцільним підходом, який сприяє підвищенню мотивації, залученості та результативності навчальної діяльності користувачів. Показано, що ЦНІ можуть виконувати дидактичну, тренувальну, контрольну та розвивальну функції, забезпечуючи активне засвоєння навчального матеріалу через інтерактивну взаємодію.

У межах дослідження окреслено методичні підходи до інтеграції ЦНІ у структуру мультимедійних ресурсів; визначено вміст ключових навчально-розвиткових функцій ЦНІ; узагальнено послідовність етапів розроблення цифрової навчальної гри як структурно-змістового елемента МОР; охарактеризовано вміст та особливості різновидів цифрових ігор, доцільних для реалізації в мультимедійних ресурсах навчального спрямування.

Результати дослідження засвідчили практичну доцільність і реалізованість запропонованих різновидів ЦНІ під час розробки багатокomпонентних МОР різного предметного спрямування.

Список літератури.

1. Khoroshevskaya, I., Khoroshevskiy, O., Hrabovskiy, Y., Lukyanova, V., & Zhytlova, I. (2024). Development of a multimedia training course for user self-development. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(2(128)), 48-63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302884>.
2. Krismadinata, Isni Kurnia, U., Mulya, R., & Verawardina, U. (2022). The Interactive Multimedia Learning for Power Electronics Course. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, 18(07), 44-56. <https://doi.org/10.3991/ijoe.v18i07.30029>.
3. Бондар, І.О. (2018). Контентний аналіз мультимедійного навчального комплексу з дисципліни «Теорія кольору». *Інформаційні технології і засоби навчання*, 63(1), 95-106. <https://doi.org/10.33407/itlt.v63i1.1886>.
4. Хорошевська, І.О. (2023). Особливості організації мультимедійних навчальних комплексів, як потужних засобів навчання. *Стратегічні напрямки розвитку науки: фактори впливу та взаємодії*. (с. 95-96).
5. Khoroshevskaya, I., Filipchuk, A., & Khoroshevskiy, O. (2025). Key features in developing the «C# Quick Learning» multimedia training complex. *Information Technologies and Learning Tools*, 108(4), 193-217. <https://doi.org/10.33407/itlt.v108i4.5980>.
6. Deineko, Z., Sotnik, S., & Lyashenko, V. (2022). Multimedia Systems in Education. *International Journal of Academic Information Systems Research*, 6(7), 23-28. <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/3f786cf6-ef00-42f7-a1a9-d0e93b0f16b6/content>.
7. Md. Rajib Hossain. (2023). A Review of Interactive Multimedia Systems for Education. *Journal of Innovative Technology Convergence*, 5(2), 11-22. <https://doi.org/10.69478/JITC2023v5n2a02>.
8. Хорошевська, І.О., & Глебов, В.О. (2021). Економіко-математичне підґрунтя розробки мультимедійного навчального видання «Теорія кольору». *Поліграфічні, мультимедійні та web-технології: монографія* (с. 136-149). Харків: ТОВ Друкарня Мадрид.
9. Khoroshevskaya, I., & Khoroshevskiy, O. (2025). Multimedia interactive training resources as important educational tools. *Memorias de SYNTOPIA*. (p. 42-43). <https://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/35922>.

10. Khoroshevska, I., & Khoroshevskiy, O. (2025). Digital training games as components of multimedia educational resource. *Information Technologies and Learning Tools*, 105(1), 52-72. <https://doi.org/10.33407/itlt.v105i1.5862>.
11. Villanueva, A., Li, C., & Riatmaja, S., D. (2026). Gamification in Higher Education: Enhancing Student Motivation and Cognitive Outcomes Through Game-Based Learning. *Journal of Social Science Utilizing Technology*, 4(1), 359-370. <https://doi.org/10.70177/jssut.v4i1.3429>.
12. Zheng, Y., Zhang, J., Li, Y., Wu, X., Ding, R., Luo, X., Liu, P., & Huang, J. (2024). Effects of digital game-based learning on students' digital etiquette literacy, learning motivations, and engagement. *Heliyon*, 10(1), e23490. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23490>.
13. Surbakti, R.T. (2025). The role of game-based learning in enhancing student learning motivation. *International Journal of Science and Research Archive*, 15(01), 333-339. <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2025.15.1.1013>.
14. Panjaburee, P., Hwang, G.J., Intarakamhang, U., Srisawasdi, N., & Chaipidech, P. (2024). Effects of a personalized game on students' outcomes and visual attention during digital citizenship learning. *Cogent Education*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2024.2351275>.
15. Хорошевська, І.О. (2020). Структура віртуального навчального середовища підтримки студентоцентрованого навчання зі спеціальності «Видавництво та поліграфія», Інформаційні технології і засоби навчання, 78(4), 203-218. <https://doi.org/10.33407/itlt.v78i4.2885>.
16. Бондар, І.О., & Грабова, А.С. (2017). Специфіка здійснення процесу розробки мультимедійного видання «Графічний дизайн». *Молодий вчений*, 9(49), 437-445.
17. Хорошевська, І. О. (2025). Важливість реалізації цифрових ігор в мультимедійних навчальних ресурсах. *Теорія модернізації в контексті сучасної світової науки*. (с. 257-260).
18. Хорошевська, І. (2025). Analysis of the implementation of digital games in multimedia educational resources. *SWorldJournal*, 4(34-04), 89-97. <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2025-34-04-052>.
19. Пушкар, О.І. (2023). Концепція створення мультимедійних інструментів освітнього простору дуальної освіти. *Поліграфія і видавнича справа*, 1(85), 101-122. <https://doi.org/10.32403/0554-4866-2023-1-85-101-122>.
20. Бондар, І.О., & Павленко, Н.О. (2014). Методика створення мультимедійного навчального комплексу з інформатики для глухонімих. *Системи обробки інформації*, 1(117), 244-250.
21. Хорошевська, І.О., & Бондар, А.В. (2019). Розробка методики створення мультимедійного видання «Самовчитель гри на фортепіано». *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*, Ч. 1, 30(69), 5, 185-193. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/30>.
22. Ahmad, A., Ismail, A., & Sunaengsih, C. (2026). Development of Interactive Learning Media WEBEPAS (Web Learning Science) Material on Properties and Changes in Form of Objects in Class IV Elementary Schools. *Journal of Innovation and Research in Primary Education*, 5(2), 2987-2999. <https://doi.org/10.56916/jirpe.v5i2.2066>.
23. Suhartatik, S., Sari, S.P., Maysara, M., & Qomaliyah, E.N. (2026). Interactive PowerPoint Based on Game-Based Learning on Environmental Pollution for Junior High School Students. *STEM Education International*, 2(1), 30-46. <https://doi.org/10.71289/stem.v2i1.18>.
24. Khoroshevska, I., Zhovta, O., & Khoroshevskiy, O. (2026). Development of a multimedia educational resource «The World of Pysanka». *Information Technologies and Learning Tools*, 112(2), 154-173. <https://doi.org/10.33407/itlt.v112i2.6261>.
25. Хорошевська, І.О. (2025). Формування брифу на створення мультимедійного навчального ресурсу. *Глобальні виклики та інновації: шляхи розвитку сучасної науки*. (с. 140-144).

26. Хорошевська, І.О. (2018). Структура представлення інформації в технічному завданні на створення мультимедійних дидактичних навчальних комплексів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, 29(68), 5, 85-93.

27. Косенко, Ю., Король, О., Боряк, О., & Чобанян, А. (2025). «Wordwall» як засіб формування історичних понять у школярів з інтелектуальними порушеннями в умовах дистанційного навчання. Інформаційні технології і засоби навчання, 106(2), 15-34. <https://doi.org/10.33407/itlt.v106i2.6023>.

28. Хорошевська, І.О., & Бутенко, К.В. (2026). Інтерактивне мультимедійне видання «Різдвяна історія» як засіб ігрового навчання у дитячій релігійній освіті. Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: технічні науки, 37(76), 1, 388-398. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.2/49>.

29. Хорошевська, І.О. (2022). Технології електронного видавництва: методичні рекомендації до лабораторних робіт для студентів спеціальності 186 "Видавництво та поліграфія" першого (бакалаврського) рівня [Електронний ресурс]. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/27996>.

30. Сайт ПНС ХНЕУ ім. С. Кузнеця. (б. д.). Персональна навчальна система освітньої компоненти «Технології електронного видавництва». <https://pns.hneu.edu.ua/course/view.php?id=2332>.

МІСЦЕВА КОРЕКЦІЯ КОЛЬОРІВ КОНТЕНТУ ДЛЯ ГАРМОНІЗАЦІЇ ВЕБСТОРИНОК

Кулішова Н.Є.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0003-1142-4100

Білець Д.Ю.

к.т.н., старший викладач, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0002-1521-826X

Гарбузова Д.С.

магістрантка, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки

***Анотація.** Сучасні веб-інтерфейси активно використовують динамічний візуальний контент, що ускладнює підтримання узгодженої кольорової гами. Невідповідність між палітрою інтерфейсу та кольорами зображень може порушувати візуальну гармонію. У роботі запропоновано семантично орієнтований підхід до гармонізації кольорів на основі простору CIELAB. Метод враховує структуру зображення, зберігає важливі елементи та вибірково коригує другорядні області, забезпечуючи природний вигляд і підвищення візуальної цілісності веб-інтерфейсів.*

***Ключові слова:** корекція кольору, гармонізація кольору, семантична сегментація, колірний простір cielab, веб-інтерфейси.*

Вступ

Більшість людей вже постійно використовує інтернет в повсякденні [1]. Більшість таких взаємодій зводиться до відвідування вебсайтів із різними цілями: розваги, пошук інформації, здійснення покупок, отримання послуг тощо. У середовищі мільйонів сторінок складно привернути увагу користувачів і виділитися серед конкурентів. Важливу роль у підвищенні відвідуваності відіграє зовнішній вигляд ресурсу, зокрема його естетика та вдало підібрана кольорова гама.

Сучасні веб-інтерфейси дедалі частіше формуються навколо динамічного контенту, такого як зображення, банери, картки товарів і матеріали, створені користувачами. На відміну від статичних інтерфейсів, де візуальна структура задається наперед, подібні системи повинні зберігати узгоджений вигляд навіть за умов постійного оновлення та зміни вмісту.

Численні дослідження демонструють стійкий зв'язок між гармонійністю веб-сайту, використаною кольоровою палітрою та загальним враженням і рівнем задоволеності користувачів [2-7]. Під час створення дизайну значна увага

приділяється добору кольорів для елементів інтерфейсу, які становлять незмінну частину візуального оформлення сторінок. Оскільки ці компоненти розробляються в графічних редакторах із застосуванням різноманітних інструментів і плагінів, дизайнери мають широкі можливості для узгодження кольорів відповідно до очікувань і вподобань аудиторії.

Водночас суттєва проблема виникає через розбіжність між кольоровими характеристиками інтерфейсних елементів і вбудованих зображень. Існує багато тематичних веб-ресурсів, де основний контент становлять часто оновлювані фотографії реальних людей, архітектурних об'єктів, визначних місць, природних сцен, подій або різних видів діяльності. До таких належать новинні портали, сайти компаній, установ та інші інформаційні ресурси та схожі платформи. На подібних сторінках доволі часто трапляються ситуації, коли кольорова гама зображень не узгоджується з оформленням інтерфейсу. Користувачі зазвичай реагують на таку дисгармонію підсвідомо: це може проявлятися у скороченні часу перебування на сторінці, зниженні зацікавленості або зміні рішення щодо подальшої взаємодії з ресурсом.

Хоча палітра інтерфейсу зазвичай визначається в межах дизайн-системи та залишається відносно стабільною, зображення можуть містити випадкові й інколи конфліктні поєднання кольорів. Унаслідок цього окремі елементи виглядають візуально неузгодженими, що порушує цілісність композиції та створює візуальний шум, який негативно впливає на сприйняття користувачем.

Отже, суть проблеми полягає не стільки в самих зображеннях, скільки у відсутності ефективних механізмів їх узгодження із загальною кольоровою схемою інтерфейсу. Використання традиційних методів кольорокорекції у цьому випадку виявляється малоефективним, адже вони зазвичай мають глобальний характер і змінюють кольорову гаму всього зображення. Водночас суттєве втручання часто є неприйнятним через змістову обумовленість візуального матеріалу. Наприклад, неможливо радикально змінювати відтінки людських облич, природної рослинності чи архітектурних об'єктів, оскільки це викликає негативну реакцію користувачів і знижує довіру до зображення. Разом із тим існують елементи на фотографіях, зміна кольору яких не порушує їхньої реалістичності, але може сприяти досягненню більшої візуальної гармонії. Такі локальні коригування дозволяють покращити загальне сприйняття сторінки без втрати змістовної достовірності зображень. Однак ручна обробка великої кількості зображень є трудомісткою, потребує участі кваліфікованих спеціалістів і значних часових ресурсів. Частково оптимізувати цей процес допомагає застосування автоматизованих методів, зокрема алгоритмів сегментації зображень за кольором, а також семантичної сегментації, що дає змогу розділяти зображення на області відповідно до їхнього змісту. У зв'язку з цим виникає потреба у підходах, здатних адаптувати динамічний візуальний контент до заздалегідь визначеної кольорової палітри інтерфейсу, не порушуючи його семантичної цінності [8]. Це зумовлює необхідність розробки методів корекції зображень на етапі їх підготовки до публікації на веб-ресурсах. Такий

підхід має забезпечувати збереження важливих і впізнаваних кольорів у ключових фрагментах, які можуть бути автоматично визначені за допомогою алгоритмів сегментації, водночас сприяючи досягненню гармонійного кольорового оформлення всієї веб-сторінки.

Мета дослідження

Метою цієї роботи є розробка та дослідження підходу до гармонізації кольорів динамічного візуального контенту у веб-інтерфейсах. Основна увага приділяється адаптації кольорового розподілу зображень відповідно до заданої палітри інтерфейсу. Важливим завданням є збереження візуально значущих елементів і недопущення їх спотворення під час корекції. Особливий акцент зроблено на напівавтоматичних методах, які забезпечують керовану зміну кольорів і зменшують потребу в ручному редагуванні.

Основна частина

Пов'язані роботи

Вплив кольорових схем на користувацький досвід і поведінку відвідувачів сайтів уже тривалий час є предметом наукових досліджень. Зокрема, чимало робіт присвячено кількісному аналізу залежності між вибором кольорової палітри та реакціями користувачів. Існують різноманітні підходи до автоматичної гармонізації кольорів зображень, проте більшість із них спрямовані або на узгодження одного зображення з іншим, або на підвищення внутрішньої цілісності кольорів у межах одного зображення. Водночас значення кольорового оформлення інтерфейсу не варто недооцінювати, адже схильність людини до певних кольорів і форм має біологічне підґрунтя [6]. Експериментальні дослідження показали, що кольорові веб-сторінки викликають вищий рівень задоволення та емоційного залучення, а також знижують рівень недовіри порівняно з чорно-білими варіантами. Зокрема, сторінки з переважанням синіх відтінків сприймаються користувачами більш позитивно, що пояснюється спрощенням когнітивної обробки інформації. Це свідчить про те, що реакції людей на елементи веб-дизайну мають не лише культурні, а й еволюційні передумови та часто відбуваються на підсвідомому рівні.

Алгоритми перенесення кольорів дозволяють узгоджувати палітру одного зображення з палітрою іншого. Науковці в роботі [9] досліджують один із класичних підходів, який базується на використанні декорельованого простору CIE LAB і передбачає вирівнювання середніх значень і дисперсій кольорових компонентів між цільовим і еталонним зображеннями. Такий метод є відносно простим у реалізації та здатний забезпечувати правдоподібні результати без складного налаштування. Однак подібні підходи не враховують контекст використання зображень: вони орієнтовані на відповідність одному еталону, а не на інтеграцію в межах заздалегідь визначеної кольорової системи інтерфейсу.

Інші підходи до роботи з кольором базуються на ітеративному коригуванні гістограм або оптимізаційних процедурах, спрямованих на зменшення відмінностей між розподілами кольорів. Методи перефарбовування, що використовують палітру, дають змогу змінювати вигляд зображення через модифікацію його домінуючих відтінків. Так, авторами дослідження [10] представлено інтерактивний інструмент, у якому палітра автоматично виділяється з початкового зображення, після чого користувач може її редагувати (наприклад, замінити зелений на червоний), а алгоритм виконує відповідне перефарбовування пікселів, зіставляючи початкові та нові кольори. Такий підхід забезпечує контрольовану зміну кольорової гами через маніпуляції з палітрою.

Інші дослідники в статті [11] запропонували інтерактивний засіб вилучення кольорових палітр, що ґрунтується на ієрархічній моделі кольору. Результати експериментів за участю користувачів засвідчили його перевагу над наявними рішеннями, що підкреслює ефективність візуальних інтерфейсів для роботи з колірними даними. В роботі [12] було розроблено підхід до проєктування кольорових схем веб-сторінок на основі даних, який враховує такі чинники, як контрастність, сумісність кольорів і їхні семантичні асоціації. Отримані результати показали, що автоматично сформовані палітри можуть перевершувати варіанти, створені непрофесійними дизайнерами, за показниками сприйняття. Загалом численні дослідження [13 – 17] демонструють широкий спектр підходів до зміни кольорів зображень – від використання вручну заданих палітр до застосування автоматично згенерованих тем, сформованих різними алгоритмічними способами.

Окрім цього, у композиції зображень широко застосовуються методи гармонізації, коли кольори об'єктів переднього плану узгоджуються з фоном. Сучасні підходи, засновані на нейронних мережах (наприклад, в статті [18]) навчаються автоматично коригувати вибрані елементи зображення таким чином, щоб вони природно інтегрувалися в оточення. Зокрема, автори роботи [19] запропонували метод АІСТ, який формує індивідуальну 3D LUT (таблицю відповідності) для кожного пікселя з урахуванням його просторового положення, що дає змогу моделювати складні локальні перетворення кольору.

Подібні методи кольорокорекції та градації базуються на різних підходах, включаючи використання глибоких нейронних мереж, і зазвичай спрямовані на досягнення візуальної узгодженості. Активний розвиток глибокого навчання та технологій штучного інтелекту значно розширив можливості дослідження цієї проблематики, відкривши нові підходи, такі як перенесення знань між моделями та умовна генерація зображень. В роботі [20] запропоновано адаптивні методи вирівнювання гістограм із використанням глибокого навчання, що дозволило підвищити контрастність і точність відтворення кольорів. Дослідження [21] поєднує семантичну сегментацію на основі нейронних мереж із методами перенесення кольору від еталонного зображення до вихідного, що сприяє покращенню кольорової гами без втрати змістовної узгодженості. Представлений в роботі [22] підхід пропонує комплексне рішення гармонізації зображень із

використанням архітектури на кшталт U-Net. У такій системі обробка виконується як у просторі RGB, так і в Lab, причому кольорові канали аналізуються незалежно. Спеціальні модулі керування дозволяють коригувати ознаки декодера мережі, забезпечуючи узгодження вигляду переднього плану з фоном.

Загалом існуючі методи демонструють високу ефективність у налаштуванні візуальних характеристик окремих зображень або їх узгодженні з певним еталонним стилем. Водночас більшість із них орієнтовані на глобальні перетворення, що може призводити до спотворення семантично важливих об'єктів і втрати природності сприйняття. Крім того, такі підходи не вирішують завдання адаптації зображень до наперед визначеної кольорової палітри інтерфейсу із збереженням їх змістового значення. Саме тому актуальною є розробка методів, які поєднують гармонізацію кольорів із урахуванням семантичних обмежень.

Колірна гармонія

Колірна гармонія є одним із фундаментальних понять у сфері візуального сприйняття та дизайну, що описує поєднання кольорів, які виглядають узгодженими, збалансованими й привабливими для ока. Хоча сприйняття кольору має певну суб'єктивність, численні дослідження в галузі психології та дизайну підтверджують, що окремі колірні комбінації стабільно викликають позитивні емоції та покращують загальне враження від зображення. Гармонійно підібрані кольори сприяють зменшенню зорового навантаження, підвищують читабельність і допомагають підтримувати цілісність візуального стилю інтерфейсу [23].

Ідея гармонії кольорів бере початок у класичних теоріях мистецтва, зокрема у працях Й. Іттена, Й.В. Гете та М.Е. Шевреля, які намагалися систематизувати принципи кольорового сприйняття. Однією з найвідоміших моделей є колірне коло Іттена – система з 12 секторів, що охоплює первинні, вторинні та третинні кольори. Така структура відображає безперервні переходи між відтінками та наочно демонструє взаємозв'язки між ними [24]. RGB-версію колірного кола наведено на рис. 1.

Колірну гармонію можна розглядати не лише як інтуїтивне явище, а й як впорядковану систему взаємозв'язків, яку можна описати геометрично. У цьому підході співвідношення між кольорами визначаються через їхнє розташування на колірному колі та кутові відстані між ними. Наприклад, комплементарні кольори розташовані навпроти один одного та формують контрастні, але збалансовані поєднання з різницею приблизно 180° (рис. 2). Аналогічні схеми включають сусідні відтінки, розташовані в межах невеликого кутового інтервалу (близько $\pm 30^\circ$), що створює м'які й стабільні композиції.

Триадні поєднання формуються трьома кольорами, рівновіддаленими на колі (приблизно на 120°), забезпечуючи баланс між різноманітністю та цілісністю. Існують також складніші варіанти, наприклад тетрадні схеми, однак вони рідше застосовуються в обчислювальних задачах.



Рисунок 1 – Колірне коло RGB від RMIT, ліцензоване за ліцензією CC BY-NC 4.0. [25]

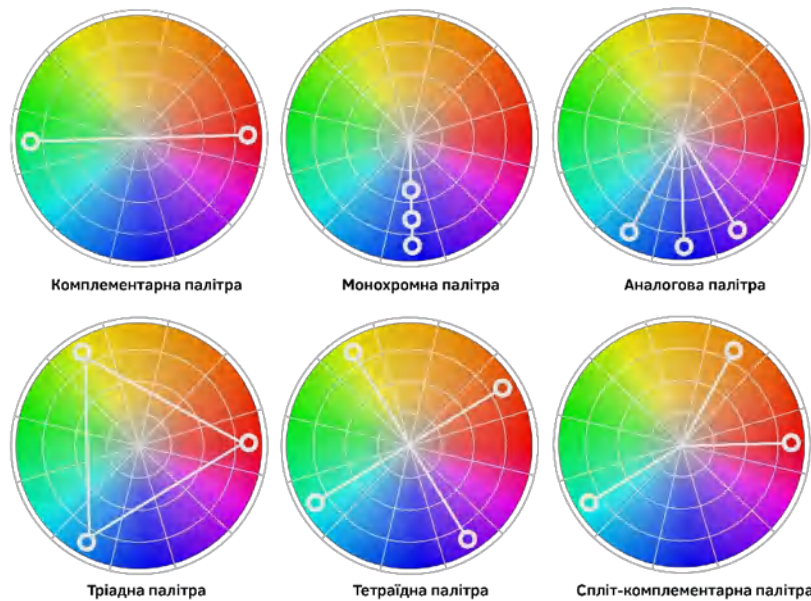


Рисунок 2 – Типи кольорових палітр [25]

Такі геометрично визначені взаємозв'язки лежать в основі багатьох практичних підходів до створення гармонійних кольорових рішень у дизайні та візуалізації.

CIELAB Space

Хоча колірне коло є зручним інструментом для інтуїтивного опису взаємозв'язків між кольорами, воно не може напряму застосовуватися для формального обчислювального аналізу. Класичні колірні простори, такі як RGB або HSL, не є перцептивно рівномірними, тобто однакові числові зміни в них не відповідають однаковим змінам, які сприймає людське око. Саме тому в задачах цифрової обробки зображень зазвичай використовують моделі, наближені до перцептивної однорідності, серед яких одним із найпоширеніших є простір CIELAB.

У моделі CIELAB колір задається трьома координатами: L , a та b . Компонента L відповідає рівню яскравості, що змінюється від чорного до білого,

тоді як вісь a описує перехід між зеленими та червоними відтінками, а вісь b – між синіми та жовтими. Така структура дає змогу розділити яскравісну та хроматичну складові, що значно спрощує незалежне керування кольором у процесі аналізу та обробки зображень.

Особливе значення для дослідження колірної гармонії має площина $a-b$, оскільки саме вона відображає хроматичні характеристики без впливу яскравості. У цій площині кожен колір можна розглядати як точку з певними координатами, а його відтінок інтерпретується як кут положення вектора відносно початку координат. Зміна відтінку відповідає обертанню вектора (a,b) навколо центру системи, тоді як насиченість визначається його віддаленістю від початку координат.

Таке геометричне подання дозволяє формалізувати принципи колірної гармонії та перевести їх у обчислювальну площину. В результаті правила, які традиційно описуються через колірне коло, можуть бути представлені як кутові співвідношення в площині $a-b$. Це відкриває можливість застосовувати геометричні перетворення для керованої модифікації кольорів у задачах обробки зображень. Таким чином, гармонійні залежності між кольорами набувають формального вигляду кутових операцій у площині $a-b$, що створює основу для їх подальшого використання в алгоритмах кольорової корекції та гармонізації.

Методологія та обладнання

Запропонований підхід забезпечує семантично усвідомлену гармонізацію кольорів шляхом узгодження колірного розподілу зображення з наперед заданою палітрою інтерфейсу, при цьому зберігаючи візуально та змістовно важливі елементи.

На початковому етапі виконується аналіз кольорової палітри інтерфейсу. Визначаються основні та додаткові кольори, закладені в дизайн-системі. Серед них обирається базовий колір, зазвичай пов'язаний із фірмовим стилем або брендом, який надалі використовується як опорна точка для всіх подальших перетворень.

Після цього здійснюється аналіз вхідного зображення. Визначаються домінуючі кольори, а саме зображення розділяється на семантично значущі та допоміжні області. Таке розділення може бути реалізоване за допомогою методів семантичної сегментації або правил, заснованих на виявленні об'єктів. До семантично важливих зон відносять ділянки, де колір має змістове навантаження (наприклад, шкіра людини, продукти, характерні матеріали), тоді як другорядні області включають тло та менш значущі елементи. Поділ необхідний для контролю ступеня допустимих кольорових змін.

На основі обраного базового кольору формується цільова гармонійна схема. Базовий колір переводиться у простір CIELAB і проєктується на хроматичну площину $a-b$. Гармонійні співвідношення задаються через кутові зсуви відносно цієї точки. Наприклад, у тріадній гармонії додаткові кольори

визначаються як напрямки, зміщені приблизно на $\pm 120^\circ$ від початкового відтинку.

Кут відтинку в площині $a-b$ може бути обчислений за формулою (рис. 3):

$$h = \arctan(b / a). \quad (1)$$

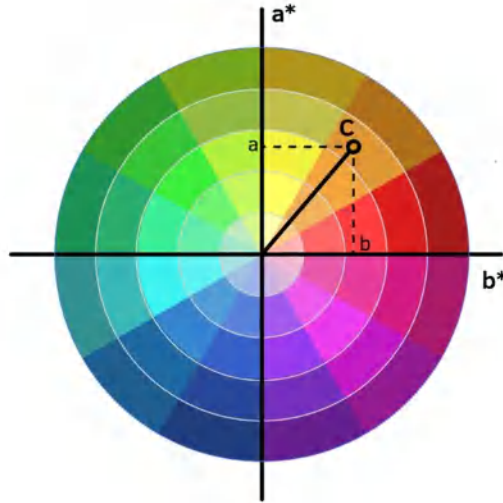


Рисунок 3 – Представлення кольору як вектору на площині $a-b$

Перетворення кольору реалізується шляхом обертання вектора (a, b) на кут α навколо початку координат:

$$a' = a \cos(\alpha) - b \sin(\alpha), \quad (2)$$

$$b' = a \sin(\alpha) + b \cos(\alpha). \quad (3)$$

На етапі трансформації виконується корекція кольорів з урахуванням семантичної структури зображення. Спочатку застосовуються глобальні зміни яскравості (компонента L) та контрастності для узгодження загального тонального вигляду з інтерфейсом. Після цього виконуються обмежені модифікації семантично важливих областей, щоб уникнути спотворення змісту. Основні кольорові зміни спрямовані на другорядні області, де корекція дозволяє наблизити зображення до цільової гармонії без втрати його семантичної цілісності.

Узагальнено умову належності кольорів до гармонійної палітри можна сформулювати як обмеження на кутові відстані між векторами проєкцій кольорів у площині $a-b$ [26, 27]:

$$\cos(C_1, C_2) = \frac{a_1^* a_2^* + b_1^* b_2^*}{\sqrt{(a_1^*)^2 + (a_2^*)^2} \sqrt{(b_1^*)^2 + (b_2^*)^2}} \leq tol. \quad (4)$$

У роботі [28] були визначені співвідношення, що описують гармонійні колірні палітри через допустимі кутові відстані між векторами на колірному колі.

Умова аналогової палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = \frac{\pi}{6} + \delta. \quad (5)$$

Умова монохроматичної палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = 0 + \delta. \quad (6)$$

Умова комплементарної палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = \pi + \delta. \quad (7)$$

Умова розщепленої комплементарної палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = \pm \frac{5\pi}{6} + \delta. \quad (8)$$

Умова тріадної палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = \frac{2\pi}{3} + \delta. \quad (9)$$

Умова тетрадної палітри:

$$\varphi(C_1, C_2) = \frac{\pi}{4} + \delta. \quad (10)$$

де C_1 – позначає вектор від центра колірної кола до точки з координатами $a_1^* b_1^*$;

C_2 – вектор від центра до точки з координатами $a_2^* b_2^*$.

Параметр δ визначає допустиме кутове відхилення, яке в межах цього дослідження прийнято рівним половині одного колірної сектора, тобто $\pi/12=15^\circ$, що відповідає $\cos(15^\circ) = 0.9659$.

Щоб врахувати природні варіації кольорів і уникнути надмірно жорстких обмежень, гармонійні співвідношення трактуються не як фіксовані значення, а як інтервали допустимих відхилень. Для цього застосовується перцептивна метрика ΔE (CIE76) [28], яка дозволяє кількісно оцінювати різницю між двома кольорами в просторі CIELAB. Різниця кольорів між двома точками визначається наступним чином (11):

$$\Delta E = \sqrt{\left((L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 \right)}. \quad (11)$$

На практиці колір вважається таким, що входить до гармонійної області, якщо його відхилення від заданого цільового напрямку не перевищує встановленого порогового значення. Зазвичай використовується діапазон $\Delta E \approx 4-7$, який відповідає мінімально помітним для людського ока відмінностям у кольорі. Такий підхід забезпечує більшу гнучкість налаштувань

і краще відповідає особливостям реальних зображень, у яких рідко зберігаються ідеально строгі геометричні співвідношення між кольорами.

Загальну структуру запропонованого методу можна подати у вигляді послідовності етапів:

- аналіз кольорової палітри інтерфейсу та визначення базового кольору;
- виділення домінуючих кольорів у вхідному зображенні;
- поділ зображення на семантично значущі та другорядні області;
- формування цільової гармонійної схеми на основі базового кольору;
- узгодження кольорів зображення з гармонійними зонами в площині $a - b$;
- застосування обмеженої корекції кольорів із урахуванням порогів ΔE .

Таким чином, процес гармонізації можна розглядати як відображення колірного розподілу зображення у множину допустимих областей у площині $a - b$, які визначаються обраною гармонійною схемою та відповідними порогом відхилення.

Презентація результатів дослідження

Для оцінювання запропонованого підходу було виконано серію експериментів із використанням реальних елементів веб-інтерфейсів, що містять динамічний візуальний контент (рис. 4). Як тестовий приклад було обрано інтерфейс веб-сайту університету, який має заздалегідь визначену кольорову систему, де основним є насичений бірюзовий відтінок. Саме цей колір виконує роль ключового візуального орієнтира в дизайні, тому він був використаний як базовий для подальшої гармонізації.

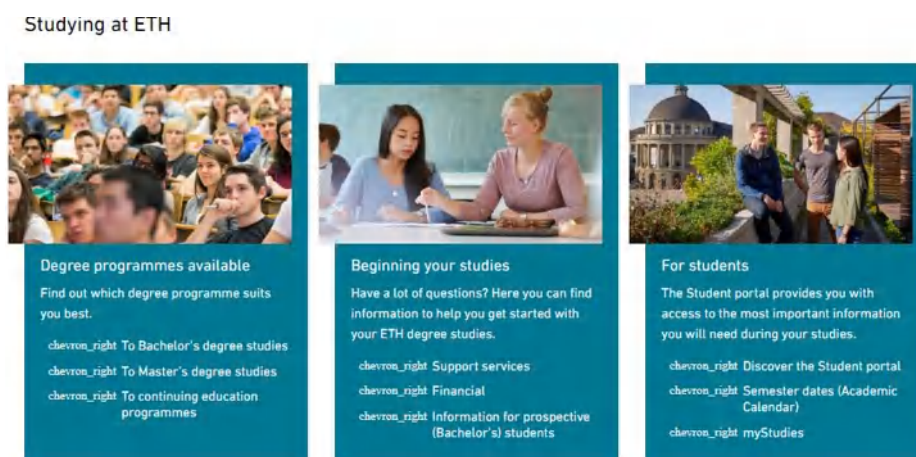


Рисунок 4 – Оригінальний веб-інтерфейс із вбудованими зображеннями до гармонізації кольорів

Вхідний набір даних складався з фотографічних зображень, інтегрованих у веб-інтерфейс. Ці зображення здебільшого відображають людей у навчальному середовищі, зокрема під час лекцій, групових занять або активностей на території кампусу. У таких зображеннях присутні як семантично важливі елементи – обличчя людей і відтінки шкіри, так і другорядні компоненти, до яких належать фон, одяг та деталі навколишнього середовища.

Відповідно до запропонованого підходу, області, що мають високе семантичне значення, зберігалися з мінімальними змінами кольору, щоб не порушувати природність і змістову достовірність зображення. Натомість другорядні області розглядалися як такі, що допускають більш суттєву корекцію кольорових характеристик з метою кращого узгодження із загальною палітрою інтерфейсу.

Висунута гіпотеза полягала в тому, що сучасні методи семантичного аналізу, засновані на глибоких нейронних мережах, здатні ефективно та однозначно розділяти фотографії на області відповідно до їх змісту, позначати ці області та пов'язувати їх із відповідними текстовими описами. Далі, використовуючи автоматично отримані словесні позначення об'єктів, передбачалося виконувати кольорокорекцію шляхом підбору допустимих відтінків для фрагментів зображення з урахуванням їх семантики.

У межах дослідження було розглянуто кілька попередньо навчених моделей, зокрема білатеральну мережу BiSeNetV2 [29], згорткові залишкові мережі ResNet50 та ResNet 101 [30], а також модель Segment Anything Model (SAM) [31]. Мережа BiSeNetV2 є архітектурою, що складається з двох паралельних гілок: одна з них відповідає за детальну локальну інформацію, тоді як інша – за глобальний контекст зображення. Поєднання цих гілок дозволяє отримати більш повне представлення ознак, підвищити точність і забезпечити стійке прийняття рішень у задачах семантичної сегментації. ResNet-50 – це згорткова нейронна мережа з 50 шарами, доступна у вигляді попередньо навченої моделі, яка була натренована на понад мільйоні зображень з бази ImageNet [32]. Вона здатна розпізнавати близько 1000 класів об'єктів, формуючи при цьому узагальнені та інформативні ознаки для різних типів зображень. ResNet-101 є більш глибокою версією цієї архітектури, що містить 101 шар і також навчається на великому наборі ImageNet, охоплюючи понад тисячу категорій. Завдяки цьому вона забезпечує ще більш детальне вилучення ознак, придатних для широкого спектра задач. Модель Segment Anything [31] розглядається як перспективне рішення для семантичної сегментації у задачах веб-дизайну. Вона працює за принципом підказок і здатна виділяти об'єкти на основі одного або кількох прикладів. Її архітектура включає енкодер зображення, модуль підказок і компактний декодер, що забезпечує швидку, інтерактивну та стійку обробку навіть неоднозначних випадків у реальних сценаріях використання.

Зображення, що входили до складу контенту вибраних веб-сторінок, були оброблені за допомогою моделей глибокого навчання для виконання семантичної сегментації. Однак отримані результати виявилися суттєво гіршими за очікувані. Хоча автоматичний поділ зображень на області загалом виконувався коректно, відповідність між виділеними сегментами та їх семантичним змістом була недостатньо точною і викликала сумніви. Приклади результатів наведено на рис. 5, а класи, визначені глибокими мережами, подано в табл. 1.

Виділені моделями колірні області також погано відповідають задачі подальшої корекції кольорів: на одному зображенні до однієї області віднесено

одяг і тіло людини, хоча вони мають різні кольори і різний зміст, на іншому зображенні всі обличчя людей всі літери написи віднесені до різних областей, хоча вони за змістом повинні бути об'єднані, і так далі.

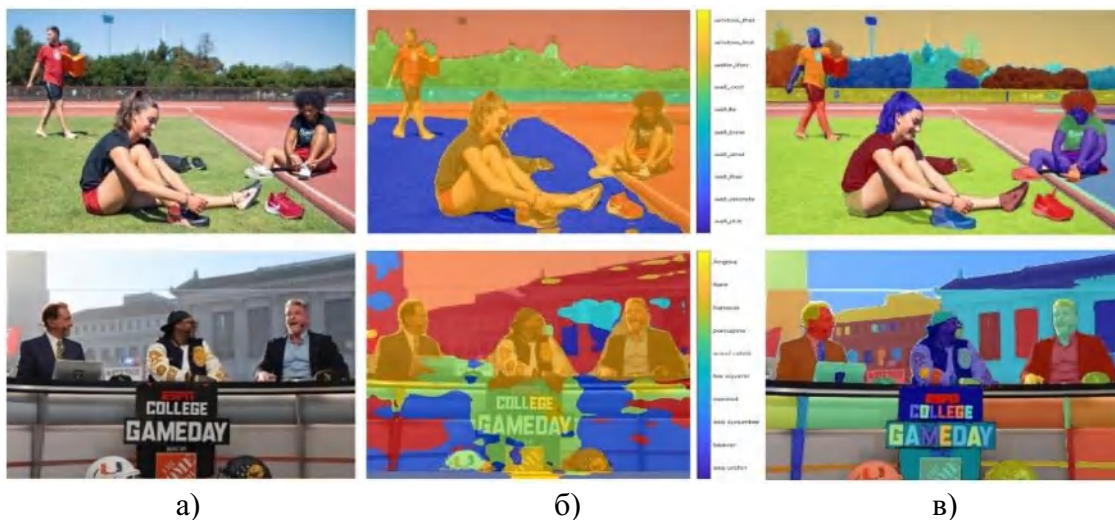


Рисунок 5 – Приклади результатів семантичної сегментації:

а) вихідні зображення; б) результат сегментації за допомогою BiSeNetV2;
в) результат сегментації за допомогою SAM

Таблиця 1 – Приклади імен класів, знайдених моделями BiSeNetV2, ResNet50 та ResNet101 для двох зображень

Приклад зображення	Класи BiSeNetV2	Класи ResNet50	Класи ResNet101
	wall_brick	papillon	speedboat
	wall_concrete	eggnog	window screen
	wall_other	jackfruit	isopod
	wall_panel	castle	wooden spoon
	wall_stone	sleeping bag	lipstick
	wall_tile	redshank	drake
	wall_wood	Band Aid	Hyena
	water_other	wok	dumbbell
	window_blind	seat belt	strawberry
	window_other	orange	custard apple
	angora	ping-pong ball	ping-pong ball
	hare	steel drum	amphibian
	hamster	television	bobsled
	porcupine	bobsled	bannister
	wood rabbit	cab	cab
	fox squirrel	bannister	submarine
	marmot	police van	racer
	sea cucumber	amphibian	pickup
	beaver	racer	cinema
sea urchin	bullet train	steel drum	

З урахуванням цих висновків було розглянуто простіший підхід до сегментації – метод k-середніх [33] у колірному просторі CIE L*a*b*. Зокрема, для наведених прикладів зображень автоматично за кольором було виділено

наступні колірні області: області неба, рослинної зелені, трави, кольорів шкіри тіла людей, матеріалу бігової доріжки, матеріалів будівель, області одягу, написів, предметів інтер'єру та ін. (рис. 6). При цьому зони, об'єднані подібними колірними властивостями, виявляються корелюючими і за змістом. І, хоча даний метод не може забезпечити видачу текстового підпису у вигляді імені класу об'єкта на зображенні, глядачеві візуально зрозумілий смисловий зв'язок фрагментів однієї колірної області, і цей зв'язок не піддається сумніву.

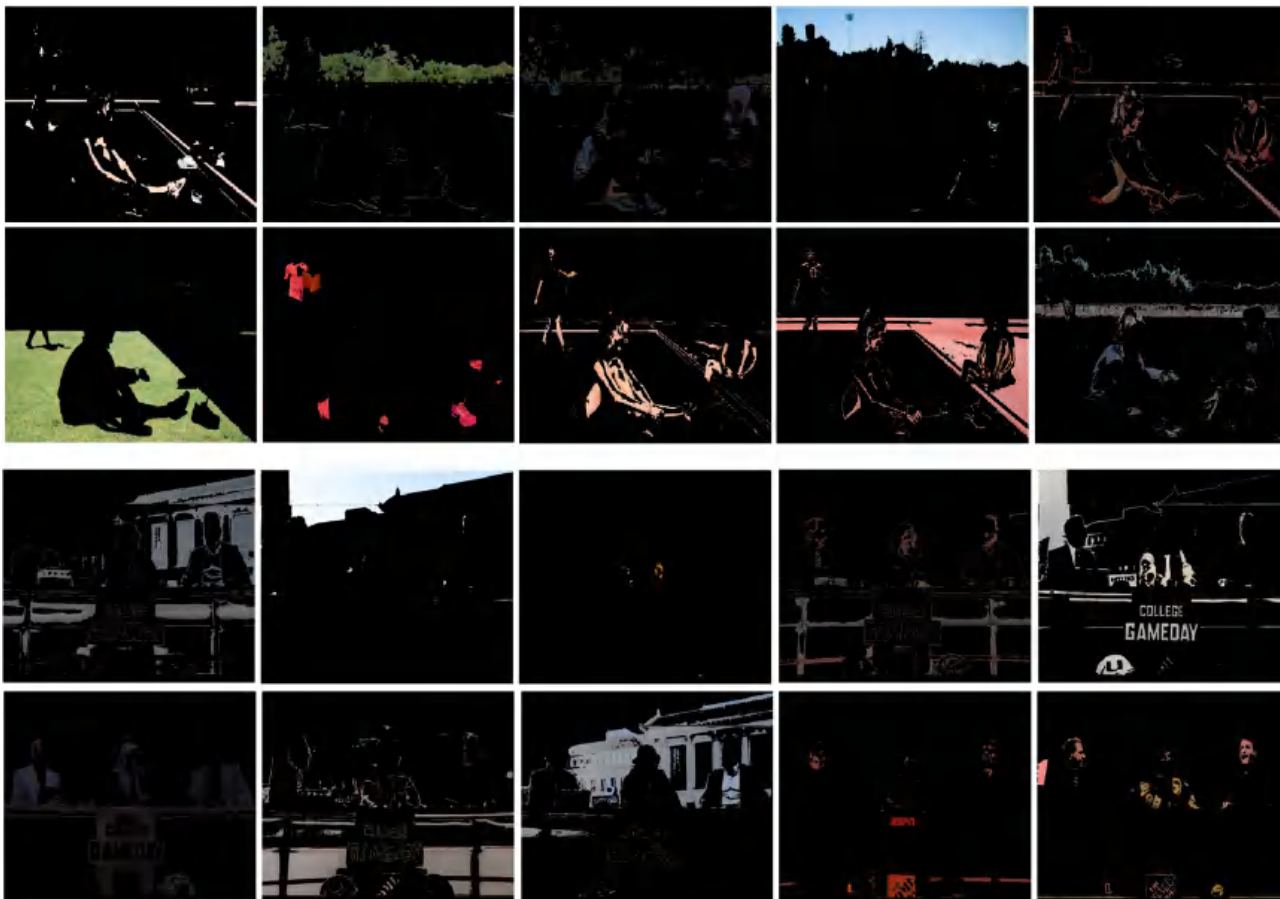


Рисунок 6 – Результати сегментації фотографій методом k-середніх у колірному просторі CIE L*a*b*

Серед кольорів перерахованих областей суттєво коригувати такі пам'ятні кольори, як колір неба, шкіри людей чи рослин та газону, неможливо – навіть невеликі їх зміни можуть призводити до негативної реакції глядачів. Однак, редагування кольорів одягу, предметів інтер'єру, другорядних об'єктів на задньому плані може гармонізувати загальний колірний зміст, та не суперечить колірній пам'яті людей. Тому для подальшого дослідження було використано метод автоматичної сегментації k-середніх.

За допомогою методу k-середніх на досліджуваних фотографіях були виділені кольори, які найчастіше зустрічаються, кількість кластерів було обрано рівним 10 (рис. 7). За скріншотами веб-сторінок були визначені координати елементів інтерфейсу L*a*b*.

На основі обраного базового кольору була сформована цільова гармонійна схема, однак із аналізу було встановлено, що 35 поєднань кольорів між фотографіями та елементами інтерфейсу не відповідають певним палітрам згідно з умовами (4-10). Водночас 57 пар «фото-інтерфейс» не були віднесені до гармонійних, тобто не демонстрували належної узгодженості кольорових поєднань.



Рисунок 7 – Приклади зображень та 10 основних кольорів, виділених на фото методом k-середніх

Отримані результати підтвердили наявність значної кількості колірних невідповідностей між динамічним візуальним контентом і елементами інтерфейсу. Це створило підґрунтя для подальшого етапу дослідження, пов'язаного з практичною реалізацією гармонізації кольорів та оцінюванням ефективності різних гармонійних схем у межах вебінтерфейсу.

Подальші експерименти були спрямовані на дослідження впливу різних гармонійних схем на узгодженість кольорів між фотографічним контентом та елементами інтерфейсу.

Емпіричні результати показали, що розщеплено-комплементарна схема кольорів забезпечує найбільш збалансований і візуально виразний ефект у межах заданого інтерфейсного контексту (рис. 8). При цьому відповідні правила слід розглядати як визначення допустимих зон для корекції кольору, а не як жорстко фіксовані цільові значення.

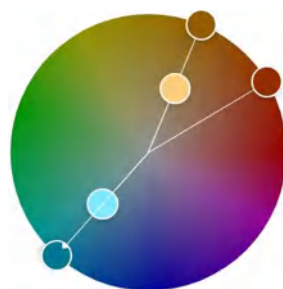


Рисунок 8 – Гармонійна розщеплено-комплементарна колірна схема інтерфейсу, сформована на основі базового кольору

Корекція кольорів виконувалася за допомогою поєднання стандартних інструментів обробки зображень, зокрема налаштувань відтінку та насиченості, корекції колірного балансу, а також вибіркового кольорових перетворень. Застосування змін мало вибіркового характеру: у семантично важливих областях використовувалися мінімальні коригування, щоб уникнути викривлення змісту та природності сприйняття, тоді як у другорядних зонах дозволялися більш інтенсивні зміни з метою узгодження їх кольорових характеристик із заданою гармонійною схемою.

Результати процесу гармонізації наведено на рис. 9, де показано порівняння вихідних і модифікованих зображень у межах інтерфейсного середовища. Візуально скориговані зображення демонструють кращу інтеграцію з загальною палітрою інтерфейсу, зменшення кольорових дисонансів і підвищення композиційної узгодженості.

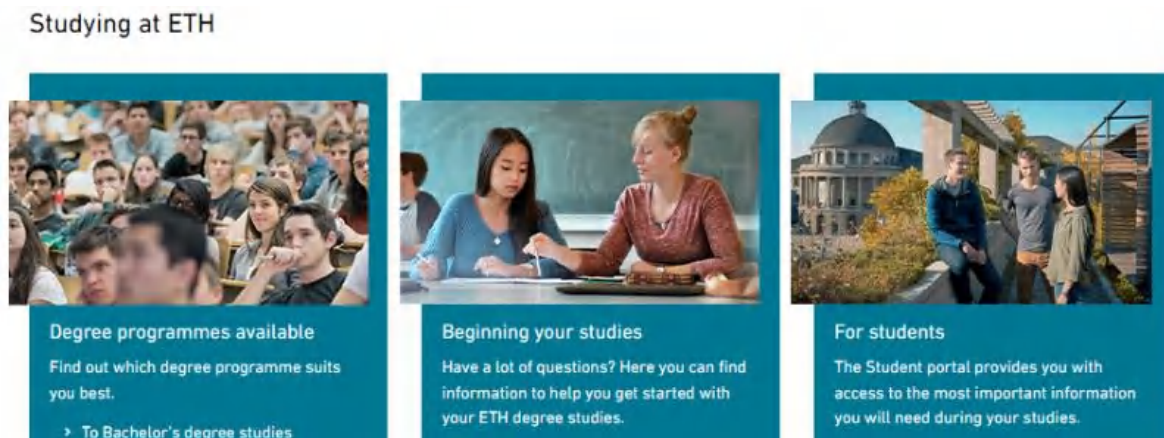


Рисунок 9 – Результат узгодження кольорів зображення в межах інтерфейсного середовища

Для числового оцінювання ефективності запропонованого підходу було застосовано метрику ΔE , яка використовується для вимірювання відхилення кольорів від заданих гармонійних діапазонів. Середні значення ΔE розраховувалися для набору зображень як до, так і після виконання обробки. Отримані результати представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Середні значення ΔE до та після виконання гармонізації

Metric	ΔE (before)	ΔE (after)
Image 1	10,39	5,58
Image 2	12,13	6,50
Image 3	13,53	6,68
Overall average	12,02	6,25

Крім того, для оцінки збереження семантично важливих ділянок окремо аналізувалися зміни кольорів у зонах шкіри людини. Середні значення ΔE між початковими та гармонізованими зображеннями в цих областях становить 3,36, що свідчить про незначні перцептивні відхилення та збереження природного вигляду.

Загальний аналіз демонструє послідовне зниження значень ΔE після виконання гармонізації, що вказує на наближення колірному розподілу

зображень до заданих гармонійних областей. Водночас введені обмеження для семантично значущих регіонів забезпечили збереження природності критичних візуальних елементів, зокрема зовнішності людини.

Для зображень, кольорова гама яких не узгоджувалася з палітрою інтерфейсу, було застосовано процедуру напівавтоматичного редагування, засновану на результатах сегментації методом k-середніх. На рис. 10 і 11 наведено приклади зображень протягом редагування.

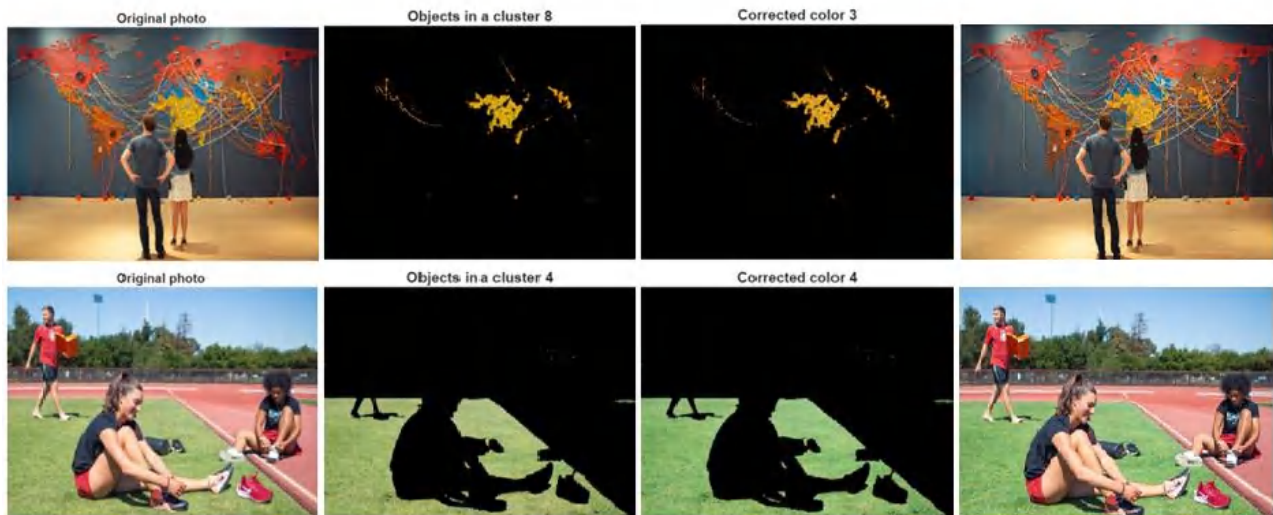


Рисунок 10 – Результати локальної гармонізуючої корекції кольорів фотографій з вебсторінки, зліва направо: вихідні зображення; варіанти кольорів, що забезпечують найближче наближення до однієї з гармонійних палітр інтерфейсу; ті самі зображення після виконаної корекції; остаточний вигляд фотографій після обробки

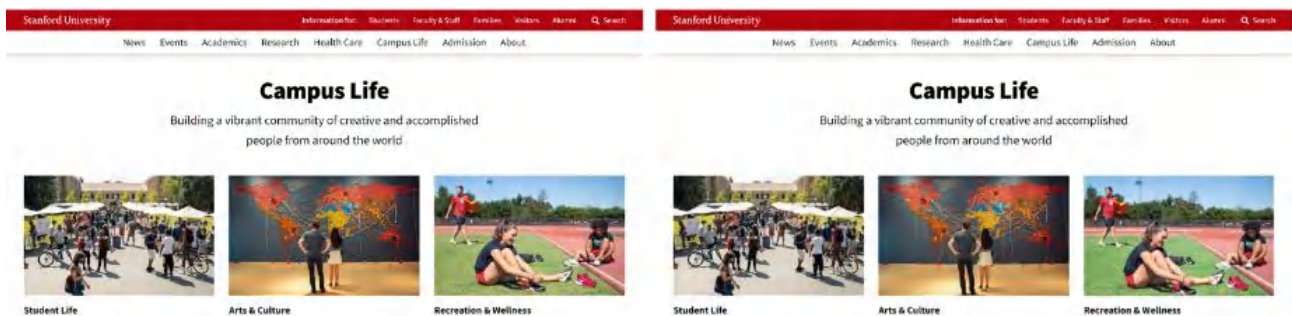


Рисунок 11 – Результати редагування веб-сторінки в цілому, зліва направо: початковий вигляд сторінки; сторінка після застосування локальної гармонізуючої корекції фотографій

Не для всіх зображень вдалося підібрати такі варіанти змін, які б не порушували змістовну логіку «пам'ятних» або сюжетно важливих кольорів.

Веб-сторінки, на яких була виконана локальна гармонізуюча корекція фотографій, були оцінені групою користувачів. До складу вибірки увійшло 18 осіб, серед яких 16 жінок і 2 чоловіки, а середній вік становив 19,8 року. Вікові характеристики учасників відповідають цільовій аудиторії сайтів закладів вищої освіти – абітурієнтам, які перебувають у процесі вибору навчального закладу.

На початковому етапі оцінювання враховувалося, наскільки дизайн уже наявних сторінок із контентом виглядає привабливим і гармонійним. Користувачам було запропоновано три критерії для оцінки якості дизайну сайтів,

а під час їхнього безпосереднього ранжування за 10-бальною шкалою були визначені вагові коефіцієнти кожного критерію (табл. 3).

Таблиця 3 – Відносні ваги критеріїв оцінювання якості дизайну сайтів

Критерій	Відносна вага критерію
Зацікавленість користувачів сайту кольорами сторінки	0,30
Відповідність колірних рішень сучасним тенденціям веб-дизайну	0,32
Гармонічність поєднання кольорів графічних елементів на сторінці сайту	0,38

Відповідно до цих критеріїв, група користувачів оцінила за 10-бальною шкалою 13 варіантів дизайну головних сторінок сайтів університетів, були отримані такі оцінки (табл. 4).

Таблиця 4 – Отримані значення рейтингу варіантів дизайну сайтів перед редагуванням

Номер зображення головної сторінки сайту	Рейтинг дизайну
1	6,03
2	4,14
3	6,69
4	5,98
5	5,31
6	6,50
7	5,98
8	6,91
9	8,28
10	7,44
11	4,60
12	7,42
13	7,60

На другому етапі користувачі вивчали відредаговані на основі запропонованого підходу до гармонізації зображення сторінок сайтів та порівнювали їх з оригінальними. Як було зазначено вище, не для всіх фотографій вдалося підібрати параметри автоматичної корекції кольору так, щоб зберегти їх правдоподібність. Таким чином, користувачі оцінювали 58 варіантів дизайну веб-сторінок з фотографіями за шкалою Сааті [34], результати оцінювання показані в табл. 5.

Як видно з табл. 5, середні оцінки виконаної кольорокорекції фотографій на веб-сторінках свідчать про загалом невисокий рівень гармонізації, однак у всіх випадках фіксується певне покращення візуального сприйняття. Водночас можна простежити певні закономірності у ставленні користувачів до різних типів редагування фото контенту. Зокрема, для сторінок, де корекція фотографій була спрямована на формування аналогової палітри з інтерфейсом, середній показник покращення становив 1,88 бала. Для варіанту з монохроматичною палітрою цей показник склав 2,05 бала, а для випадків із комплементарною розщепленою палітрою – 2,39 бала. Це дозволяє зробити висновок, що саме для комплементарної розщепленої схеми навіть незначні зміни у кольорах фотографій суттєво підвищують їхню візуальну привабливість.

Таблиця 5 – Результати оцінювання ступеня покращення дизайну веб сторінки після гармонізації кольорів з фотографіями контенту

Зображення в парі, які підлягали порівнянню		Тип палітри	Середня оцінка ступеня покращення
Номер зображення головної сторінки сайту	Номер фото зі сторінки, що редаговано		
1	3	Analog	1,50
2	3	Analog	1,94
2	3	Analog	2,22
2	1, 3	Analog	1,50
2	1, 2, 3	Analog	1,83
3	3	Analog	2,17
3	2, 3	Analog	2,00
4	2	Analog	1,39
4	2, 3	Analog	1,83
5	3	Analog	2,06
5	1, 3	Analog	2,17
6	3	Analog	2,11
7	7	Analog	1,33
7	9	Analog	2,17
8	1	Complementary split	2,33
8	1, 2	Complementary split	1,94
9	1.	Monochromatic	2,06
10	2	Monochromatic	2,00
10	2, 3	Monochromatic	2,83
11	3	Monochromatic	1,78
7	1	Monochromatic	1,56
12	1, 2	Complementary split	2,33
12	2	Complementary split	2,17
12	1, 2, 3	Complementary split	2,33
12	1, 2, 3, 4	Complementary split	2,00
13	1	Complementary split	2,56
13	1, 2	Complementary split	3,00
13	1, 2, 3	Complementary split	2,61
13	1, 2, 3, 4	Complementary split	2,61

Крім того, веб-сторінки, на яких фотографії були скориговані під аналогову палітру, у середньому отримали оцінку 5,80 бала за 10-бальною шкалою. Сторінки з корекцією під монохроматичну палітру були оцінені дещо вище – у середньому на рівні 6,77 бала. Найвищі оцінки отримали сторінки, де застосовувалася корекція під комплементарну розщеплену палітру – середній показник становив 7,31 бала.

Підсумовуючи, можна запропонувати узагальнену схему процесу підготовки фотографій для часто оновлюваного контенту веб-сторінок.

Робочий процес гармонізації кольорового оформлення веб-сторінок із фотографіями можна подати як послідовність взаємопов'язаних етапів, кожен із яких спрямований на підвищення візуальної цілісності та покращення сприйняття користувачем.

Етап 1: аналіз існуючого дизайну веб-сторінки. На цьому етапі визначається основна кольорова палітра інтерфейсу: виділяються ключові відтінки, що використовуються у фонових елементах, кнопках, текстових блоках та інших складових інтерфейсу. Саме ці кольори надалі виступають орієнтирами для аналізу та корекції зображень.

Етап 2: дослідження нової фотографії, яка планується до розміщення на сторінці. Оскільки такі зображення часто додаються незалежно від загальної кольорової концепції сайту, виникає потреба оцінити їхню сумісність із інтерфейсом. Для цього виконується сегментація зображення за кольорами у просторі CIELAB із виділенням домінантних відтінків. У результаті фотографія розбивається на кілька кольорових кластерів, що описують основні візуальні області.

Етап 3: обчислення показника колірної гармонії між зображенням та інтерфейсом. На основі кутових співвідношень у просторі a-b визначається ступінь відповідності наявного поєднання одній із гармонійних схем.

Етап 4: прийняття рішення, коли перевіряється, чи відповідає отримане значення заданому порогу гармонійності. Якщо умова виконується, зображення може бути використане без змін. Якщо ж гармонія недостатня, визначаються ділянки зображення, які можна коригувати, з урахуванням обмежень щодо збереження природних і «сюжетно важливих» кольорів.

Етап 5: семантично обґрунтована локальна корекція кольорів обраних областей. Зміни спрямовані на узгодження палітри фотографії з інтерфейсною схемою без втрати реалістичності та змістовної достовірності зображення.

Етап 6: завершальний крок у вигляді розміщення обробленої фотографії на веб-сторінці. Це забезпечує більш узгоджене візуальне середовище та позитивно впливає на загальний користувацький досвід.

Отримані результати підтверджують працездатність запропонованого підходу та показують його потенціал як узагальненої методики обробки цифрових зображень на етапі підготовки веб-контенту.

Висновки

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що розглянута проблема стосується візуальної неузгодженості у веб-інтерфейсах, яка виникає через активне використання динамічного контенту з довільними кольоровими характеристиками. Така невідповідність між зображеннями та елементами інтерфейсу негативно впливає на цілісність сприйняття сторінки та загальний користувацький досвід, що робить задачу гармонізації кольорів особливо актуальною в сучасному веб-дизайні.

Запропонований у роботі підхід спрямований на поєднання трьох ключових компонентів: семантичної сегментації зображень, кількісної оцінки колірної гармонії та локальної корекції кольорів. На відміну від класичних методів, які зазвичай змінюють усе зображення цілком або орієнтуються на

глобальне вирівнювання стилю, розроблений метод забезпечує вибіркочув обробку окремих областей. Це дозволяє зберігати природність та змістову достовірність зображень, уникаючи небажаних візуальних спотворень.

Важливим теоретичним внеском є використання колірною простору CIELAB, у якому колірні взаємозв'язки можуть бути представлені у вигляді геометричних відношень. Завдяки цьому гармонійні схеми формалізуються через кутові співвідношення у хроматичній площині, що робить можливим їх застосування в обчислювальних алгоритмах. Такий підхід дозволяє перейти від інтуїтивного розуміння гармонії кольорів до її математичного опису та автоматизації.

Ключову роль у методі відіграє семантична сегментація, яка дозволяє розділяти зображення на змістовно важливі та другорядні області. Це забезпечує різний рівень впливу на колір: критично важливі елементи зберігаються майже без змін, тоді як другорядні можуть бути суттєво адаптовані до палітри інтерфейсу. Таким чином досягається баланс між візуальною узгодженістю та збереженням змісту.

Додаткову гнучкість методу забезпечує використання порогових значень на основі метрики ΔE , що дозволяє трактувати гармонійність не як жорстке правило, а як допустимий діапазон відхилень. Це наближає результати до природного сприйняття кольору людиною і робить систему більш адаптивною до реальних умов використання.

Експериментальні результати показали, що запропонований підхід позитивно впливає на візуальне сприйняття веб-сторінок. Хоча покращення оцінюються як помірні, користувачі відзначають підвищення естетичної узгодженості. Найбільш виражений ефект спостерігається при використанні комплементарних гармонійних схем.

Водночас дослідження виявило певні обмеження, зокрема залежність результатів від параметрів алгоритмів та складність корекції деяких типів зображень без втрати їхньої природності. Це вказує на необхідність подальшого вдосконалення методів сегментації та адаптації кольору.

Запропонований підхід можна розглядати як крок у напрямку розвитку інтелектуальних систем веб-дизайну, які не лише оформлюють контент, але й оптимізують його візуальне сприйняття. Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію методу в практичні інструменти, розширення його адаптивності та створення автоматизованих систем гармонізації кольору для динамічного веб-контенту.

Матеріали цього дослідження доцільно використовувати в освітньому процесі дисципліни «Основи теорії кольору та кольоровідтворення» під час вивчення тем, пов'язаних із сучасними колірними моделями, цифровим кольоровідтворенням та гармонізацією кольору у веб-середовищі. Запропонований підхід є практичним прикладом застосування колірною простору CIELAB для аналізу та корекції кольорів у динамічному контенті. На його основі здобувачі зможуть дослідити принципи перцептивної рівномірності,

метрику ΔE та особливості побудови гармонійних колірних схем у цифрових інтерфейсах. Матеріал може бути використаний під час лекцій, лабораторних і практичних занять для формування навичок аналізу колірних палітр, оцінювання візуальної узгодженості та адаптації зображень до вимог дизайн-систем. Дослідження також сприятиме розумінню сучасних тенденцій автоматизації процесів кольорокорекції та ролі семантичного аналізу у веб-дизайні й цифрових мультимедійних технологіях.

Також результати роботи будуть корисними під час вивчення дисципліни «Системний аналіз та підтримка прийняття рішень», оскільки безпосередньо пов'язані з впровадженням аналізу процесу розробки інтерфейсу веб-сторінок як системи складної системи з великою кількістю змінних і взаємозалежностей. Описані методи сегментації зображень демонструють використання моделей для виділення суттєвих компонентів системи. Застосування простору CIELAB і метрики ΔE ілюструє формалізацію критеріїв оцінювання та прийняття рішень. Робота також демонструє, як математичні моделі можуть бути використані для опису візуального сприйняття. Важливим є використання геометричних обмежень і кутових співвідношень для побудови гармонійних схем. Це допомагає зрозуміти принципи побудови формальних моделей у системному аналізі. Порівняння різних підходів до сегментації навчає оцінювати альтернативи та обирати оптимальні рішення. Дослідження містить приклад багатокритеріального прийняття рішень, де враховуються як естетичні, так і семантичні вимоги. Аналіз результатів за допомогою кількісних показників демонструє важливість об'єктивного оцінювання ефективності системи. Опис експериментів із реальними вебінтерфейсами показує практичне застосування методів аналізу даних і машинного навчання. Матеріал також ілюструє інтеграцію алгоритмів штучного інтелекту у процес підтримки прийняття рішень. У цілому текст формує розуміння того, як системний аналіз дозволяє поєднувати математичні методи, інформаційні технології та людське сприйняття для розв'язання прикладних задач.

Список літератури.

1. Statista. (2025). Number of internet and social media users worldwide as of October 2025. <https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>.
2. Alotaibi, N. (2025). Color as a visual element on website appeal and its impact on user experience (UX) in graphic design. *AWARI*, 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.47909/awari.744>.
3. Kuo, L., Chang, T. & Lai C.-C. (2022). Affective psychology and color display of interactive website design. *Displays*, 71, 102134, <https://doi.org/10.1016/j.displa.2021.102134>.
4. Hegemann, L. & Oulasvirta, A. (2024). Palette, Purpose, Prototype: The Three Ps of Color Design and How Designers Navigate Them. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '24)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 147, 1-19. <https://doi.org/10.1145/3613904.3641976>.
5. Seifi, A. & Moshayeri, A. (2024). The Influence of Color Schemes and Aesthetics on User Satisfaction in Web Design: An Empirical Study. *International Journal of Advanced Human Computer Interaction*, 2 (2), 33-43.

6. Nissen, A., Riedl, R. & Schütte, R. (2024). Users' reactions to website designs: A neuroimaging study based on evolutionary psychology with a focus on color and button shape. *Computers in Human Behavior*, 155, 108168, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2024.108168>.
7. Abildayeva, T. & Shamoï, P. (2024). Fuzzy Logic Approach For Visual Analysis Of Websites With K-means Clustering-based Color Extraction. *ArXiv*, abs/2408.00774.
8. Weingerl, P. (2024). Automated Image-Based User Interface Color Theme Generation. *Applied Sciences*, 14(7), 2850. <https://doi.org/10.3390/app14072850>.
9. Reinhard, E., Ashikhmin, M., Gooch, B. & Shirley, P. (2001). Color Transfer between Images. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21, 34-41. 10.1109/38.946629.
10. Chang, H., Fried, O., Liu, Y., DiVerdi, S. & Finkelstein, A. (2015). Palette-based photo recoloring. *ACM Transactions on Graphics*, 34, 4, 139:1-139:11. <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1145/2766978>.
11. Karim, R.M., Jeong, T., Ha, H., Ho, J., Lee, K., Shin, H.J. (2023). Improving user experience of color palette extraction by using interactive visualization based on hierarchical color model. *Int. J. Human-Computer Studies*, 169, 102924.
12. Gu, Z., Lou, J. (2016). Data driven webpage color design. *Computer-Aided Design*, 77, 46-59, <https://doi.org/10.1016/j.cad.2016.03.001>.
13. Iwasa S., Yamaguchi Y. (2018). Color Selection and Editing for Palette-Based Photo Recoloring. 2257-2261. 10.1109/ICIP.2018.8451712.;
14. Zhang, Q., Nie, Y., Zhu, L., Xiao, C. & Zheng, W.-S. (2022). A Blind Color Separation Model for Faithful Palette-Based Image Recoloring. *Trans. Multi.* 24, 1545-1557. <https://doi.org/10.1109/TMM.2021.3067463>.
15. Shugrina, M., Kar, A., Fidler, S. & Singh, K. (2020). Nonlinear color triads for approximation, learning and direct manipulation of color distributions. *ACM Transactions on Graphics*, 39, 4, 97.
16. Tigwell, G. W., Flatla, D.R. & Archibald, N. D. (2017). ACE: A colour palette design tool for balancing aesthetics and accessibility. *ACM Transactions on Accessible Computing* 9, 2, Article 5.
17. Phan, H. Q., Fu, H. & Chan, A. B. (2017). Color orchestra: Ordering color palettes for interpolation and prediction. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24, 6, 1942-1955.
18. Cong, W., Zhang, J., Niu, L., Liu, L., Ling, Z., Li, W., & Zhang, L. (2019). DoveNet: Deep Image Harmonization via Domain Verification. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 8391-8400.
19. Lan, X., Li, Z., Liu, Q., Meng, Q., Nie, L. & Zhang, S. (2024). High-Resolution Image Harmonization with Adaptive-Interval Color Transformation. 13769-13793. 10.52202/079017-0441.
20. Li, C., Jiao, Z. (2024) Deep Learning-Optimized CLAHE for Contrast and Color Enhancement in Suzhou Garden Images. (IJACSA) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15, 12, 805-814.
21. Lv, C., Zhang D. (2024). Palette-based Color Transfer between Images. *arXiv:2405.08263v1 [cs.CV]*.
22. Tan, L., Li, J., Niu, L. & Zhang, L. (2023). Deep Image Harmonization in Dual Color Spaces. In *Proceedings of the 31st ACM International Conference on Multimedia (MM '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2159-2167. <https://doi.org/10.1145/3581783.3612404>.
23. Wang, S., Liu, J., Jiang, J., Jiang, Y. & Lan, J. (2022). Attribute analysis and modeling of color harmony based on multi-color feature extraction in real-life scenes. *Front. Psychol.* 13:945951. doi: 10.3389/fpsyg.2022.945951.
24. Itten, J. (1961). *The Art of Color: The Subjective Experience and Objective Rationale of Color*. Reinhold.
25. Cianci, L. (2023). *Colour Theory: Understanding and Working With Colour*. RMIT Open Press: Melbourne, Australia.

26. Oliinyk, V., Biziuk, A., Kulishova, N. & Bilets D. (2025). Software Development for Customizing Web Resource Design According to User Preferences. *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. V.1. (p. 607-613).
27. Kulishova, N., Sajek, D. (2025). Using Machine Learning and Generative Intelligence in Book Cover Development. *Journal of Imaging*, 11(2), 46. <https://doi.org/10.3390/jimaging11020046>.
28. Fraser, B., Bunting, F. & Murphy, C. (2004). *Real World Color Management* (2nd ed.). Pearson Education.
29. Changqian, Y., Gao, C., Wang, J., Yu, G., Shen, C. & Sang, N. (2021). BiSeNet V2: Bilateral Network with Guided Aggregation for Real-Time Semantic Segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 129(11), 3051-68. <https://doi.org/10.1007/s11263-021-01515-2>.
30. He, K., Zhang, X., Ren, S. & Sun, J. (2016). Deep Residual Learning for Image Recognition. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. (p. 770-778). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>.
31. Kirillov, A., Mintun, E., Ravi, N., Mao, H., Rolland, C., Gustafson, L., Xiao, T. et al. (2023). Segment Anything, April 5, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02643>.
32. ImageNet. (n. d.). <http://www.image-net.org>.
33. MacQueen, J. (1967). Some Methods for Classification and Analysis of Multivariate Observations. *Proc. Fifth Berkeley Sympo-Sium Math. Stat. Probab*, 1, 281-297.
34. *Expert Judgement in Risk and Decision Analysis*. (2021). Ed. By Anca M. Hanea, Gabriela F. Nane, Tim Bedford, Simon French. – Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46474-5>.

РОЛЬ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АВТОМАТИЗАЦІЇ UX/UI-ДИЗАЙНУ ПРИ СТВОРЕННІ ВЕБ-ЗАСТОСУНКІВ

Краєвська О.О.

доцент, кафедра «Геометричного моделювання та комп'ютерної графіки»,
Національний технічний університет ХПІ
ORCID: 0000-0002-8460-958X

Шеліхова І.Б.

к.т.н., доцент, кафедра «Геометричного моделювання та комп'ютерної графіки»,
Національний технічний університет ХПІ
ORCID: 0000-0002-5637-1850

Адашевська І.Ю.

к.т.н., доцент, кафедра «Геометричного моделювання та комп'ютерної графіки»,
Національний технічний університет ХПІ
ORCID: 0000-0002-8460-958X

***Анотація.** У статті досліджено роль штучного інтелекту в автоматизації UX/UI-дизайну веб-застосунків. Розглянуто генеративний дизайн, персоналізацію інтерфейсів та автоматизоване тестування. Проведено порівняльний аналіз традиційного й AI-орієнтованого підходів, визначено критерії ефективності та запропоновано гібридну модель.*

***Ключові слова:** штучний інтелект, UX/UI дизайн, генеративний дизайн, персоналізація інтерфейсу, автоматизація, веб-застосунки.*

Вступ

Стрімкий розвиток цифрових технологій зумовив трансформацію підходів до створення веб-застосунків та інтерактивних інформаційних систем. У сучасному цифровому середовищі якість користувацького досвіду (User Experience, UX) та інтерфейсу користувача (User Interface, UI) є ключовими чинниками конкурентоспроможності програмних продуктів. Високий рівень юзабіліті, зручність навігації, адаптивність інтерфейсу та емоційна привабливість безпосередньо впливають на ефективність взаємодії користувача з веб-ресурсом, рівень залученості та конверсійні показники.

Традиційні підходи до UX/UI-проектування ґрунтуються на методологіях дизайн-мислення, прототипування, багатоетапного тестування та ітеративного вдосконалення інтерфейсу. У процесі розробки широко застосовуються сучасні інструменти проектування, зокрема Figma та Adobe XD, що забезпечують можливість створення інтерактивних прототипів та організації спільної роботи команди. Проте навіть за умови використання сучасного програмного забезпечення процес розробки залишається трудомістким, потребує значних

часових і людських ресурсів та значною мірою залежить від суб'єктивного досвіду дизайнера.

Ускладнення структури веб-застосунків, зростання обсягів даних про поведінку користувачів та потреба в персоналізації інтерфейсів у режимі реального часу спричинили пошук нових підходів до автоматизації проєктних процесів. У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування технологій штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI) та машинного навчання для оптимізації UX/UI-дизайну. Інтелектуальні алгоритми здатні аналізувати великі масиви поведінкових даних, прогнозувати дії користувачів, автоматично генерувати варіанти макетів та адаптувати інтерфейс до індивідуальних потреб аудиторії.

Одним із найбільш показових прикладів інтеграції штучного інтелекту в екосистему графічного проєктування є платформа Adobe Sensei. Це інтелектуальний шар, побудований на алгоритмах машинного та глибокого навчання, який інтегровано в професійні інструменти на кшталт Photoshop, Illustrator та Adobe XD. У сфері автоматизації UX/UI-дизайну він бере на себе критично важливі завдання, що безпосередньо впливають на ефективність розробки. Завдяки функціям Content-Aware Fill і Select Subject значно скорочується час на технічну підготовку графічних активів, що мінімізує витрати на етапі UI-дизайну. Технологія Auto-Reframe забезпечує інтелектуальну респонсивність, автоматично адаптуючи контент під різні формати екранів і зберігаючи композиційну цілісність. Використання нейронних фільтрів відкриває можливості для генеративної ретуші та стилізації, дозволяючи змінювати освітлення, вік чи емоційне забарвлення зображень за допомогою текстових запитів або параметричних маніпуляцій, що раніше вимагало багатогодинної ручної роботи. У результаті Adobe Sensei демонструє гібридну модель дизайну, де штучний інтелект виконує трудомісткі та повторювані операції, звільняючи когнітивний ресурс дизайнера для стратегічного проєктування користувацького досвіду та творчого пошуку.

Сучасні AI-платформи, такі як Adobe Sensei, демонструють можливості інтеграції алгоритмів машинного навчання у процеси дизайну, зокрема для автоматизованого підбору композиційних рішень, оптимізації кольорових схем, персоналізації контенту та аналізу ефективності взаємодії користувачів з інтерфейсом. Поява спеціалізованих інструментів генеративного дизайну сприяє формуванню нового підходу до створення веб-застосунків, у межах якого частина рутинних операцій передається алгоритмічним системам.

Разом із тим, інтеграція штучного інтелекту в UX/UI-проєктування породжує низку теоретичних і практичних питань, таких як визначення меж автоматизації, оцінка впливу алгоритмічних рішень на креативність дизайну, ризик стандартизації інтерфейсів, а також необхідність забезпечення етичності й прозорості використання даних користувачів. Незважаючи на активний розвиток відповідних технологій, проблема системного аналізу ролі штучного інтелекту в

автоматизації UX/UI-дизайну та оцінки його ефективності залишається недостатньо дослідженою.

Отже, актуальність теми зумовлена потребою в науковому обґрунтуванні застосування технологій штучного інтелекту в процесі створення веб-застосунків, визначенні їхнього впливу на якість користувацького досвіду та формуванні моделей автоматизованого UX/UI-проєктування. Дослідження ролі AI в автоматизації дизайну інтерфейсів сприятиме підвищенню ефективності розробки цифрових продуктів та визначенню перспектив подальшого розвитку інтерактивних веб-систем.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка можливостей застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації процесів UX/UI-дизайну при створенні веб-застосунків, а також оцінювання їх ефективності порівняно з традиційними підходами проєктування інтерфейсів.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання завдань, пов'язаних з аналізом сучасного стану розвитку UX/UI-дизайну веб-застосунків та визначенням основних етапів й методологічних підходів до проєктування користувацьких інтерфейсів, дослідженням напрямів та особливостей застосування технологій штучного інтелекту й машинного навчання у сфері автоматизації проєктування інтерфейсів, зокрема в аспектах генеративного дизайну, персоналізації та автоматизованого тестування, визначенням критеріїв та показників оцінювання ефективності UX/UI-дизайну, таких як час розробки, кількість ітерацій, рівень юзабіліті, показники взаємодії користувачів, розробкою моделі автоматизованого UX/UI-проєкту із використанням алгоритмів штучного інтелекту та описом її структурних складових, проведенням порівняльного аналізу традиційного та AI-орієнтованого підходів до проєктування веб-інтерфейсів на основі визначених критеріїв, а також узагальненням отриманих результатів та формулюванням висновків щодо доцільності й перспектив впровадження технологій штучного інтелекту в процесі UX/UI-дизайну.

Об'єктом дослідження є процес проєктування користувацьких інтерфейсів веб-застосунків.

Предметом дослідження є методи, моделі та інструментальні засоби автоматизації UX/UI-дизайну на основі технологій штучного інтелекту.

Методи дослідження включають системний аналіз наукових джерел, порівняльний аналіз традиційних та AI-орієнтованих підходів, метод моделювання процесів проєктування, експертне оцінювання, а також елементи статистичної обробки результатів експериментального дослідження.

Основна частина

У сучасних умовах цифровізації UX/UI-дизайн є ключовим складником процесу створення веб-застосунків. Якість користувацького досвіду визначає не лише зручність використання продукту, але й його конкурентоспроможність, рівень залученості користувачів та ефективність досягнення бізнес-цілей.

Визначення UX та UI полягає в тому, що UX-дизайн (User Experience Design) – це процес проектування взаємодії користувача з цифровим продуктом, спрямований на забезпечення зручності, логічності, ефективності та позитивного емоційного сприйняття під час використання веб-застосунку. UX охоплює дослідження потреб користувачів, аналіз сценаріїв взаємодії, структурування інформації, прототипування та тестування юзабіліті. UI-дизайн (User Interface Design) – це розробка візуальної складової інтерфейсу, що включає композиційне розташування елементів, типографіку, кольорові рішення, графічні компоненти та інтерактивні елементи. UI визначає зовнішній вигляд продукту та забезпечує візуальну узгодженість і доступність інтерфейсу. Таким чином, UX орієнтований на функціональність і логіку взаємодії, тоді як UI відповідає за естетичну та візуальну реалізацію цієї взаємодії.

Етапи проектування UX/UI включають дослідження та аналіз вимог, на якому здійснюється визначення цільової аудиторії, аналіз потреб користувачів, формування персонажів (user personas), аналіз конкурентів та постановка функціональних вимог до продукту, а також проектування інформаційної архітектури, де визначається структура веб-застосунку, логіка навігації, ієрархія сторінок і взаємозв'язок між елементами системи. Далі створюються вайрфрейми (wireframes), тобто схематичні моделі сторінок без детального графічного оформлення, що дозволяє зосередитися на структурі та функціональності. Наступним є прототипування, коли створюються інтерактивні прототипи, які імітують реальну взаємодію користувача з продуктом, що дає змогу провести первинне тестування сценаріїв використання. Потім відбувається візуальний дизайн (UI-розробка), де формується остаточне візуальне оформлення: кольорова палітра, типографіка, графічні компоненти, іконографіка, адаптивні елементи. Завершується процес тестуванням та ітераційним вдосконаленням, що передбачає юзабіліті-тестування, А/В-тестування, збір зворотного зв'язку та подальше вдосконалення інтерфейсу (рис. 1).



Рисунок 1 – Схема етапів UX/UI-проектування

Зазначена послідовність є ітеративною: результати тестування можуть спричиняти повернення до попередніх етапів для оптимізації рішення.

Методології UX/UI-проектування охоплюють такі підходи, як Design Thinking та Agile. Design Thinking – це людиноцентричний підхід до розробки продуктів, що ґрунтується на глибокому розумінні потреб користувачів, і класична модель включає етапи емпатії, формулювання проблеми, генерації ідей, прототипування та тестування. Дана методологія орієнтована на креативність, експериментування та постійний зворотний зв'язок із користувачем. Agile – це гнучкий підхід до розробки програмного забезпечення, який передбачає короткі ітераційні цикли (спринти), регулярні оновлення продукту та тісну взаємодію між командами. У контексті UX/UI Agile дозволяє поступово вдосконалювати інтерфейс на основі реальних даних про поведінку користувачів та швидко адаптуватися до змін вимог. Поєднання Design Thinking та Agile створює ефективну модель розробки, у межах якої креативне проектування поєднується з гнучкістю реалізації.

Інструментальні засоби UX/UI-дизайну охоплюють сучасні платформи, серед яких найбільш поширеними є Figma та Adobe XD. Вони забезпечують створення інтерактивних прототипів, підтримують командну взаємодію та стандартизують процес проектування.

Figma є хмарною платформою для спільного проектування інтерфейсів, що підтримує створення інтерактивних прототипів, дизайн-систем та командну взаємодію в режимі реального часу. Перевагою інструменту є можливість інтеграції з іншими сервісами та централізоване управління компонентами інтерфейсу. Adobe XD орієнтований на створення високоточних прототипів і взаємодію з екосистемою Adobe, при цьому інструмент підтримує анімацію, адаптивні макети та інтерактивне тестування інтерфейсів. Застосування зазначених інструментів дозволяє стандартизувати процес проектування, підвищити точність реалізації інтерфейсів та оптимізувати взаємодію між дизайнерами і розробниками. Водночас навіть використання сучасного програмного забезпечення не усуває повністю проблеми високої трудомісткості, залежності від людського фактора та необхідності багаторазових ітерацій. Таким чином, теоретичні основи UX/UI-дизайну формують методологічну базу для подальшого дослідження можливостей автоматизації процесів проектування за допомогою технологій штучного інтелекту, що буде розглянуто в наступних підрозділах.

Разом із тим, сучасний розвиток цих платформ демонструє різні стратегії інтеграції штучного інтелекту, що потребує окремого порівняльного аналізу.

При порівняльному аналізі інструментарію виявлено, що якщо Adobe XD робить ставку на інтелектуальну обробку графічних активів та складні анімаційні переходи, то її основний конкурент – Figma – активно розвиває напрямок генеративного дизайну. Зокрема, впровадження інструментів на базі штучного інтелекту у Figma дозволяє дизайнерам автоматично створювати структури сторінок (sitemap) та початкові макети на основі текстових описів. Це підтверджує гіпотезу дослідження: автоматизація зміщується від простого

спрощення маніпуляцій з об'єктами до інтелектуального синтезу цілісних інтерфейсних рішень. Порівняння представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння Adobe XD та Figma у контексті інтеграції ШІ

Критерій порівняння	Adobe XD (Традиційний з AI-модулями)	Figma (Сучасний хмарний стандарт)
Інтеграція ШІ	Використовує Adobe Sensei для автоматизації рутини (ресайз, повторювані сітки).	Використовує Figma AI (після оновлення 2024 року) для генерації дизайну за текстом.
Прототипування	Глибоке проектування мікро-взаємодій та голосове керування.	Зручне створення інтерактивних прототипів з використанням змінних (Variables).
Автоматизація контенту	Плагіни та вбудована функція Repeat Grid.	Потужні плагіни (як-от Relume або Builder.io) для автоматичної генерації коду з дизайну.
Екосистема	Безшовна інтеграція з Photoshop та Illustrator.	Велика спільнота (Community) та бібліотека безкоштовних AI-плагінів.

Таким чином, інструментарій UX/UI-дизайну поступово трансформується від допоміжних функцій автоматизації до генеративних можливостей, що підтверджує актуальність гібридної моделі проектування, у якій креативність дизайнера поєднується з аналітичними можливостями алгоритмів штучного інтелекту.

Активний розвиток технологій штучного інтелекту (Artificial Intelligence, AI) та машинного навчання (Machine Learning, ML) сприяв трансформації підходів до створення цифрових продуктів. У сфері UX/UI-дизайну застосування AI відкриває можливості автоматизації рутинних операцій, підвищення рівня персоналізації інтерфейсів та оптимізації процесів прийняття дизайнерських рішень на основі аналізу великих масивів даних.

Генеративний дизайн передбачає використання алгоритмів, здатних автоматично створювати варіанти інтерфейсних рішень на основі заданих параметрів, обмежень та вхідних даних. У контексті UX/UI це включає автоматичну генерацію макетів сторінок, підбір композиційних рішень, формування дизайн-систем, оптимізацію кольорових схем та адаптацію типографіки. Алгоритми машинного навчання аналізують великі масиви існуючих інтерфейсів, поведінкові патерни користувачів та статистичні показники ефективності, такі як конверсія, час взаємодії та показник відмов. На основі цього формується прогноз оптимального розташування елементів, структури навігації та візуальної ієрархії. Сучасні інструменти, зокрема Adobe Sensei, інтегрують алгоритми машинного навчання в процес проектування, автоматизуючи обробку зображень, адаптивне масштабування елементів, розпізнавання об'єктів та оптимізацію контенту. Інші рішення, такі як Uizard та Galileo AI, дозволяють генерувати інтерфейсні макети на основі текстового опису або ескізу, що суттєво скорочує час створення прототипу. Генеративний

підхід не замінює повністю дизайнера, однак виконує функцію інтелектуального асистента, який пропонує варіанти рішень та автоматизує рутинні процеси.

Однією з ключових переваг застосування штучного інтелекту у UX/UI-дизайні є можливість глибокої персоналізації інтерфейсу. На відміну від статичних інтерфейсів, AI-системи здатні адаптувати контент і структуру взаємодії відповідно до поведінкових характеристик конкретного користувача. Персоналізація реалізується через аналіз історії взаємодії, класифікацію користувачів за поведінковими ознаками, рекомендаційні алгоритми та динамічне налаштування інтерфейсних елементів. Моделі машинного навчання можуть прогнозувати наступні дії користувача, оптимізувати порядок відображення інформації та автоматично підлаштовувати інтерфейс під індивідуальні сценарії використання. Це особливо актуально для електронної комерції, освітніх платформ та інформаційних порталів. Персоналізація підвищує рівень залученості користувачів, зменшує когнітивне навантаження та покращує загальний користувацький досвід.

AI також активно застосовується у процесах тестування та оптимізації інтерфейсів. Традиційне A/B-тестування потребує значного часу та ручної обробки результатів. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє автоматично аналізувати теплові карти (heatmaps), визначати проблемні зони інтерфейсу, прогнозувати рівень конверсії та оптимізувати розташування елементів без повного циклу тестування. Інтелектуальні системи здатні аналізувати поведінку користувачів у реальному часі та пропонувати зміни до інтерфейсу з метою підвищення ефективності взаємодії.

До основних переваг застосування технологій штучного інтелекту у UX/UI-дизайні належать скорочення часу розробки, автоматизація рутинних операцій, підвищення точності прийняття рішень на основі даних, глибока персоналізація та можливість прогнозування поведінки користувачів. Водночас існують певні обмеження, такі як ризик стандартизації та втрати унікальності дизайну, залежність від якості навчальних даних, етичні аспекти використання персональних даних та обмежена здатність алгоритмів до креативного мислення. Таким чином, штучний інтелект у UX/UI-дизайні доцільно розглядати як інструмент підтримки та оптимізації процесу проектування, а не як повну заміну людського фактора. Найбільш ефективним є гібридний підхід (рис. 2), що поєднує креативність дизайнера та аналітичні можливості алгоритмів машинного навчання.

Метою експериментального дослідження є кількісна оцінка ефективності автоматизації UX/UI-дизайну із застосуванням технологій штучного інтелекту порівняно з традиційним підходом проектування веб-застосунків.

Для забезпечення об'єктивності дослідження було реалізовано два варіанти прототипу веб-застосунку однакового функціонального призначення.

Варіант А (традиційний підхід) передбачав проектування інтерфейсу вручну з використанням інструментів Figma та Adobe XD без застосування AI-алгоритмів.



Рисунок 2 – Порівняння традиційного та AI-орієнтованого підходів

Варіант Б (AI-орієнтований підхід) передбачав розробку із використанням генеративних алгоритмів та інструментів автоматизованого проектування, зокрема функцій інтелектуальної підтримки в Adobe Sensei, а також автоматизованої оптимізації макетів. Обидва прототипи мали ідентичні функціональні вимоги, структуру сторінок та цільову аудиторію.

Для порівняльного аналізу було визначено критерії оцінювання ефективності, зокрема час розробки (T) як сумарний час створення прототипу в годинах, кількість ітерацій (I) як кількість циклів досягнення прийнятного рівня юзабіліті, показник юзабіліті (U) оцінений за шкалою System Usability Scale (SUS), коефіцієнт конверсії (C) як частку користувачів, які успішно виконали цільову дію, та рівень задоволеності користувачів (S) як середню експертну оцінку за 10-бальною шкалою.

Формалізація показників ефективності здійснювалася наступним чином. Відносне скорочення часу розробки обчислювалося за формулою:

$$\Delta T = \frac{T_{trad} - T_{AI}}{T_{trad}} \times 100\% . \quad (1)$$

Коефіцієнт оптимізації ітераційності визначався як:

$$K_I = \frac{I_{trad} - I_{AI}}{I_{trad}} . \quad (2)$$

Індекс підвищення юзабіліті розраховувався за виразом:

$$\Delta U = \frac{U_{AI} - U_{trad}}{U_{trad}} \times 100\% . \quad (3)$$

Комплексний показник ефективності (E) інтегрував усі ключові метрики з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$E = w_1 \Delta T + w_2 K_I + w_3 \Delta U + w_4 \Delta C + w_5 \Delta S . \quad (4)$$

де w_1, w_2, w_3, w_4, w_5 – вагові коефіцієнти, визначені методом експертного оцінювання;

ΔC та ΔS – відносні зміни конверсії та задоволеності відповідно.

Відносні зміни конверсії та задоволеності розраховувались за виразом:

$$\Delta C = \frac{C_{AI} - C_{trad}}{C_{trad}} \times 100\% . \quad (5)$$

$$\Delta S = \frac{S_{AI} - S_{trad}}{S_{trad}} \times 100\% . \quad (6)$$

У межах даного дослідження було прийнято рівнозначні ваги для всіх компонентів ($w_1 = 0,2$), що забезпечило збалансовану оцінку як часових, так і якісних аспектів ефективності.

Для формалізації процесу автоматизованого UX/UI-проектування було розроблено модель, що складається з п'яти послідовних етапів. На першому етапі здійснюється збір поведінкових даних користувачів, які відображають особливості їхньої взаємодії з цифровим середовищем, зокрема фіксуються кліки, час перебування на сторінці, шляхи користувача, помилки та інші метрики, що надходять із веб-аналітики, логів системи та сенсорів мобільних пристроїв. Другий етап передбачає обробку отриманих даних алгоритмами машинного навчання, що дозволяє виявити закономірності та проблемні точки у використанні інтерфейсу за допомогою моделей класифікації та кластеризації, а також прогнозувати проблемні точки інтерфейсу та визначати оптимальні сценарії взаємодії.

Третій етап полягає у генерації інтерфейсу, де система автоматично формує варіанти UI-рішень на основі аналізу даних, використовуючи адаптивні шаблони, що змінюються залежно від профілю користувача. Четвертий етап – автоматичне тестування, що включає А/В-експерименти, юзабіліті-тести та симуляції взаємодії, під час яких генеровані інтерфейси перевіряються на ефективність, а система збирає нові дані про кожен варіант. Завершальний п'ятий етап – оптимізація, яка забезпечує ітеративне вдосконалення UX/UI до досягнення цільових метрик, таких як зручність використання, конверсія та задоволеність користувачів, з коригуванням інтерфейсу на основі результатів тестування.

Структуроване представлення моделі наведено на рис. 3, що демонструє логіку послідовності етапів та їх функціональне призначення у вигляді послідовності: Збір поведінкових даних (Data Collection) → Обробка алгоритмами машинного навчання (ML Processing) → Генерація інтерфейсу (Interface Generation) → Автоматичне тестування (Automated Testing) → Оптимізація (Optimization).

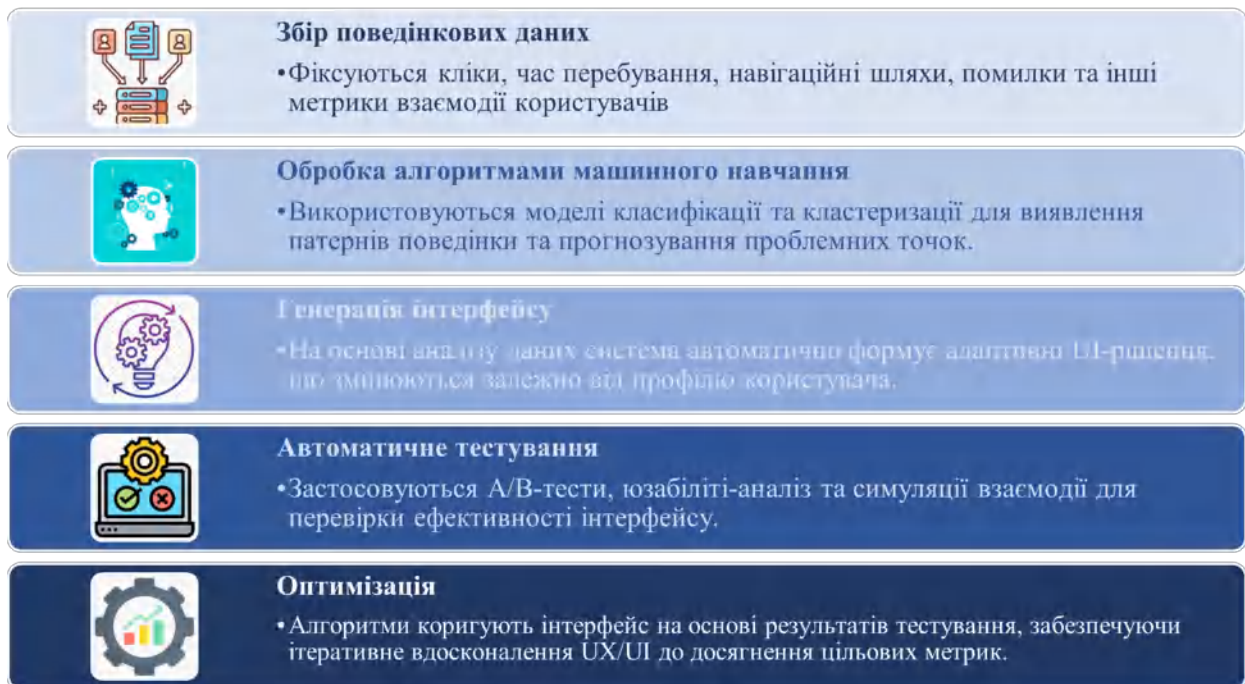


Рисунок 3 – Модель автоматизованого UX/UI процесу

Результати досліджень

Отримані експериментальні дані представлені на рис.4, де порівнюються показники традиційного підходу та AI-підходу, зокрема час розробки (40 годин проти 24 годин), кількість ітерацій (5 проти 3), SUS (72 проти 84), середній час виконання завдання (58 секунд проти 41 секунди), конверсія (63 % проти 78 %) та задоволеність (7,2 проти 8,6).

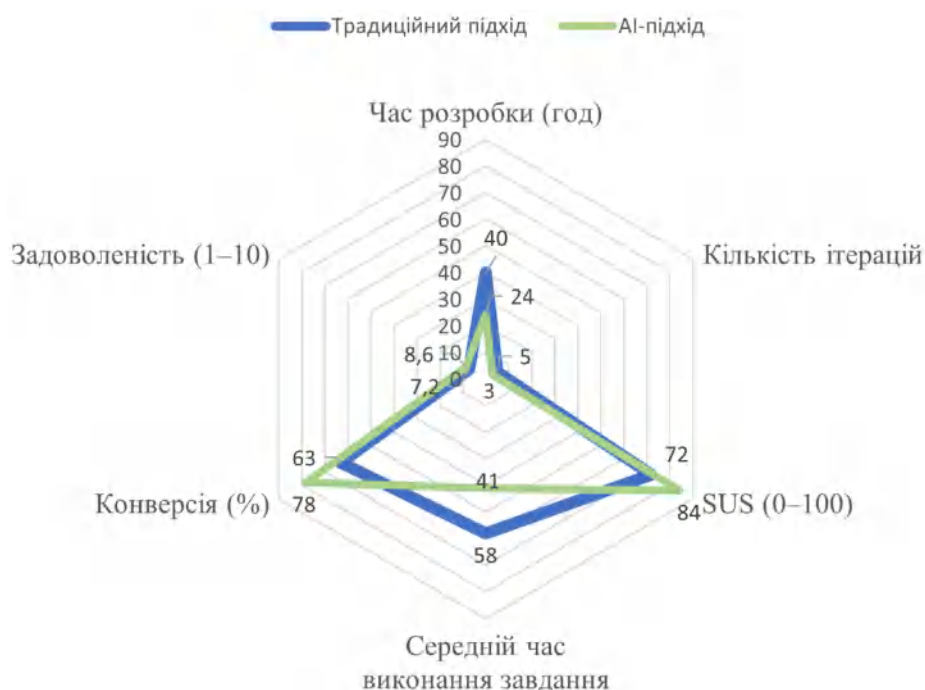


Рисунок 4 – Діаграма результатів експерименту

Розрахунок ефективності включає скорочення часу розробки, зменшення кількості ітерацій, підвищення юзабіліті, зростання конверсії та комплексний показник ефективності.

Інтерпретація результатів свідчить, що застосування технологій штучного інтелекту дозволяє скоротити час розробки приблизно на 40 %, зменшити кількість ітерацій досягнення оптимального рішення, підвищити показники юзабіліті, покращити поведінкові метрики користувачів та збільшити конверсію. Комплексний індекс ефективності (28,0 %) підтверджує доцільність впровадження AI-орієнтованих інструментів у процес UX/UI-проектування. Водночас результати демонструють, що максимальний ефект досягається при використанні гібридної моделі, у якій автоматизовані алгоритми підтримують прийняття дизайнерських рішень, але не замінюють творчий контроль фахівця.

Інтеграція технологій штучного інтелекту в процеси UX/UI-проектування, поряд із очевидними перевагами, актуалізує низку етичних питань, що потребують системного осмислення. Насамперед йдеться про прозорість алгоритмічних рішень та їх інтерпретованість. Користувачі повинні мати можливість розуміти, яким чином система формує персоналізовані інтерфейси, які дані використовуються для цього та які обмеження накладаються на процес прийняття рішень. Відсутність прозорості рішень може призвести до зниження довіри до цифрового продукту та викликати сумніви щодо коректності його функціонування.

Другим важливим аспектом є питання захисту даних. Оскільки персоналізація інтерфейсів ґрунтується на аналізі поведінкових характеристик користувачів, виникає ризик надмірного збору та використання конфіденційної інформації. Це потребує впровадження чітких політик щодо анонімізації даних, обмеження доступу до них та дотримання міжнародних стандартів захисту інформації, таких як GDPR. Етична відповідальність розробників полягає у забезпеченні балансу між функціональністю системи та правом користувача на приватність.

Окремої уваги заслуговує проблема стандартизації інтерфейсів. Використання генеративних алгоритмів може призвести до уніфікації дизайнерських рішень, що знижує рівень креативності та індивідуальності продуктів. У цьому контексті важливо зберігати роль дизайнера як стратегічного архітектора користувацького досвіду, який визначає унікальність та емоційну привабливість інтерфейсу, тоді як штучний інтелект виконує функції інтелектуального асистента.

Не менш значущим є питання відповідальності за наслідки використання ШІ. У випадку помилкових рішень або некоректної персоналізації виникає потреба у визначенні, хто несе відповідальність – розробник алгоритму, дизайнер чи компанія-замовник. Це ставить завдання формування етичних стандартів і правових норм, що регулюють використання штучного інтелекту в цифровому дизайні.

Таким чином, етичний вимір застосування ШІ в UX/UI-дизайні охоплює прозорість, конфіденційність, креативність та відповідальність. Усвідомлення та врахування цих аспектів є необхідною умовою для формування збалансованої моделі автоматизації, яка поєднує технологічні переваги з гуманістичними цінностями та забезпечує довіру користувачів до цифрових продуктів.

Висновки

У ході проведеного дослідження було здійснено комплексний теоретичний та експериментальний аналіз впливу технологій штучного інтелекту на процеси UX/UI-проектування цифрових продуктів.

У першій частині роботи узагальнено теоретичні основи UX/UI-дизайну, визначено сутність понять користувацького досвіду та користувацького інтерфейсу, систематизовано етапи проектування та охарактеризовано сучасні методологічні підходи, зокрема Design Thinking та Agile. Встановлено, що ефективність цифрового продукту визначається не лише естетичними характеристиками інтерфейсу, а й глибиною аналітики поведінки користувачів, ітеративністю процесу розробки та адаптивністю рішень.

У другій частині дослідження розглянуто можливості застосування технологій штучного інтелекту у сфері UX/UI-дизайну. Доведено, що генеративні алгоритми та моделі машинного навчання здатні автоматизувати рутинні етапи проектування, забезпечувати варіативність інтерфейсних рішень, здійснювати поведінкову аналітику та реалізовувати персоналізований підхід до користувача. Встановлено, що найбільший потенціал мають алгоритми генеративного дизайну, адаптивні рекомендаційні системи та інструменти автоматизованого тестування.

У межах експериментального дослідження було проведено порівняльний аналіз традиційного підходу до створення інтерфейсу та AI-орієнтованої моделі проектування. Результати кількісної оцінки продемонстрували скорочення часу розробки на 40 %, зменшення кількості ітерацій, підвищення показників юзабіліті, зростання конверсії та рівня задоволеності користувачів, а також комплексний приріст ефективності на 28,0 %. Отримані результати підтверджують гіпотезу дослідження про те, що інтеграція технологій штучного інтелекту у процес UX/UI-дизайну підвищує ефективність розробки та якість користувацького досвіду.

Водночас встановлено, що повна автоматизація процесу є недоцільною. Найбільш ефективною є гібридна модель, у межах якої штучний інтелект виконує функцію аналітичного та генеративного інструменту підтримки прийняття рішень, тоді як стратегічний та креативний контроль залишається за дизайнером. Порівняльний аналіз функціональних можливостей наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз функціональних можливостей AI-інструментів у дизайні

Інструмент	Тип платформи	Ключові AI-функції	Переваги для UX/UI розробки
Adobe XD / Sensei	Професійний векторний редактор	Content-Aware Layout, Auto-Reframe, інтелектуальне розпізнавання об'єктів.	Безшовна інтеграція з Adobe CC, точне проектування складних анімацій.
Figma / Figma AI	Хмарний сервіс для командної роботи	Генерація макетів за запитом, автоматичне створення стилів та компонентів.	Найкращі можливості для колаборації, величезна база AI-плагінів від спільноти.
Uizard	AI-native інструмент генерації	Перетворення начерків (Wireframes) від руки у цифрові макети, генерація дизайну за текстовим описом.	Максимальна швидкість прототипування, низький поріг входу для не-дизайнерів.
Galileo AI	Генеративна нейромережа	Створення складних UI-інтерфейсів високої точності (High-fidelity) на основі промптів.	Генерує редаговані файли Figma, висока якість візуальних рішень.

Представлені в таблиці 2 дані свідчать про те, що ринок інструментів автоматизації розділився на два основні вектори.

1. Асистентські системи (Adobe XD, Figma), які впроваджують алгоритми ШІ для оптимізації рутинних дій професійного дизайнера.

2. Генеративні системи (Uizard, Galileo AI), які автоматизують етап синтезу ідей та створення первинних прототипів.

У рамках нашого дослідження встановлено, що найбільш ефективною є комбінація цих підходів: використання генеративних систем на етапі ідеї (генерація концепцій) та професійних асистентів на етапі фіналізації та тестування інтерфейсу.

Таким чином, дослідження підтвердило доцільність впровадження AI-технологій у практику UX/UI-проективання та окреслило перспективи подальших наукових розвідок у напрямі адаптивних інтерфейсів, поведінкової аналітики та інтелектуальних дизайн-систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці комплексної моделі кількісної оцінки ефективності застосування технологій штучного інтелекту в UX/UI-дизайні з використанням інтегрального показника результативності, формалізації критеріїв порівняння традиційного та AI-орієнтованого підходів до проектування інтерфейсів на основі часових, поведінкових та якісних показників, обґрунтуванні доцільності використання гібридної моделі взаємодії дизайнера та інтелектуальних алгоритмів у процесі створення цифрових продуктів, а також систематизації сучасних напрямів застосування генеративних алгоритмів та персоналізованих рекомендаційних систем у UX/UI-дизайні.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості впровадження розробленої методики оцінювання ефективності у діяльність ІТ-компаній, стартапів та дизайн-студій, використанні запропонованої кількісної моделі для прийняття управлінських рішень щодо доцільності інтеграції AI-інструментів у процес розробки, застосуванні результатів дослідження у навчальному процесі підготовки фахівців з UX/UI-дизайну та цифрового проектування, а також потенціалі масштабування моделі для аналізу ефективності AI-рішень у суміжних галузях цифрового дизайну.

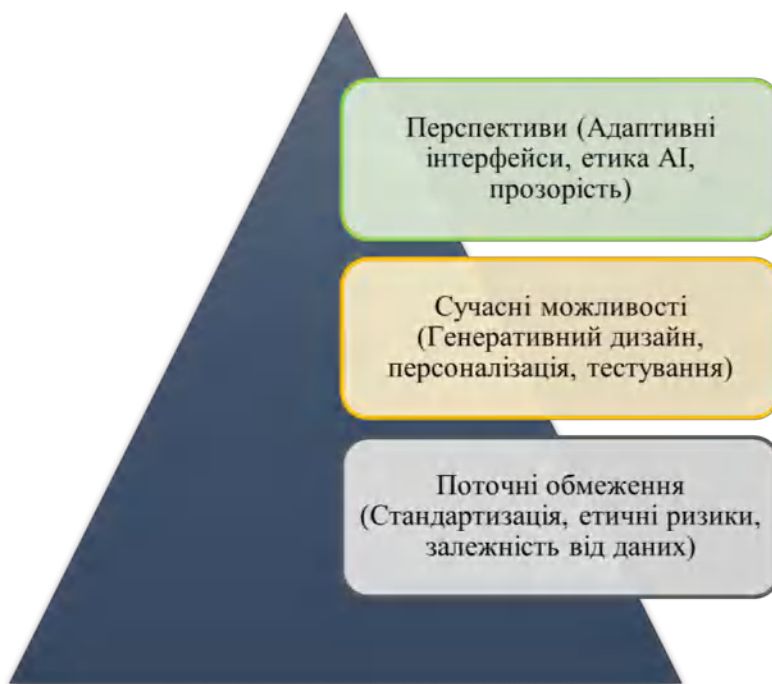


Рисунок 5 – Пірамідална діаграма перспектив розвитку

Попри отримані позитивні результати, проведене дослідження має певні обмеження, серед яких експериментальна частина базувалася на обмеженій кількості прототипів та вибірці користувачів, що може впливати на узагальнюваність отриманих результатів, оцінювання ефективності здійснювалося в межах конкретного типу веб-застосунку, що не враховує специфіку мобільних платформ, складних інформаційних систем або продуктів із високим рівнем інтерактивності, а також використані AI-інструменти відображають актуальний стан технологій, який є динамічним і швидко змінюється, що може впливати на релевантність кількісних показників у довгостроковій перспективі. Окремим обмеженням є складність повної формалізації якісних аспектів дизайну, зокрема креативності, емоційного впливу та естетичної цілісності інтерфейсу, які частково залишаються поза межами кількісних моделей оцінювання.

Здійснене дослідження підтвердило, що застосування технологій штучного інтелекту в UX/UI-дизайні веб-застосунків сприяє автоматизації рутинних процесів, підвищенню рівня персоналізації інтерфейсів та оптимізації прийняття дизайнерських рішень. Порівняльний аналіз традиційних та AI-

орієнтованих підходів показав ефективність гібридної моделі, у якій креативність дизайнера поєднується з аналітичними можливостями алгоритмів.

Водночас інтеграція ШІ у сферу UX/UI породжує низку етичних викликів, що стосуються прозорості алгоритмічних рішень, захисту даних користувачів, ризику стандартизації інтерфейсів та визначення відповідальності за наслідки автоматизації. Врахування цих аспектів є необхідною умовою для формування збалансованої моделі проектування, яка поєднує технологічні переваги з принципами відповідального використання та очікуваннями користувачів до цифрових продуктів.

Таким чином, перспективи розвитку UX/UI-дизайну на основі штучного інтелекту полягають не лише у вдосконаленні технічних інструментів, але й у створенні етичних стандартів, що гарантуватимуть відповідальне та прозоре використання алгоритмів у процесах цифрового проектування.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням вибірки експериментальних даних, інтеграцією поведінкової аналітики у режимі реального часу, розробкою адаптивних інтерфейсів на основі глибинного навчання, а також удосконаленням математичних моделей оцінювання ефективності AI-орієнтованого проектування. Доцільним є також дослідження етичних аспектів використання штучного інтелекту в UX/UI-дизайні та впливу алгоритмічної персоналізації на когнітивну автономію користувачів. Таким чином, подальший розвиток досліджень у зазначеному напрямі сприятиме формуванню науково обґрунтованої методології інтеграції штучного інтелекту в практику цифрового дизайну та розширенню меж застосування інтелектуальних систем у сфері взаємодії людини з цифровим середовищем.

Список літератури.

1. Адашевська, І.Ю., Краєвська, О.О., & Шеліхова, І.Б. (2024). UX-дизайн та UI-дизайн – два ключові аспекти розробки та впровадження інтерактивних веб-ресурсів та програмних додатків. Інновації та розвиток: монографія. (с. 82-94). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».
2. Analytics Insight. (2025). How AI-driven personalization is transforming user interface design. Analytics Insight. www.analyticsinsight.net.
3. Schönberger, M. (2024). Artificial intelligence in UX/UI design: A research framework for exploring the impact of AI tools on design quality. *Lecture notes in networks and systems*, (1054), 511-524. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5035-1_40.
4. Sebastian, N. (2026). How does AI user experience elevate design? *Generative UX/UI trends and tips for business growth*. GoodFirms Insights. www.goodfirms.co
5. Stige, A., Zamani, E.D., Mikalef, P., & Zhu, Y. (2024). Artificial intelligence (AI) for user experience (UX) design: A systematic literature review and future research agenda. *Information Technology & People*, 37(6), 2324-2352. <https://doi.org/10.1108/ITP-07-2022-0519>.

METHODOLOGICAL JUSTIFICATION FOR AI-INTEGRATED STEAM EDUCATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR FUTURE PROFESSIONALS IN THE PUBLISHING AND PRINTING INDUSTRY

Andriushchenko T.

Senior Lecturer, Department of Multimedia Systems and Technologies,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID ID: 0000-0001-8620-5717

***Abstract.** This paper examines the theoretical and methodological foundations for integrating AI into STEAM education for the training of future professionals in the publishing and printing industry. It demonstrates how combining the interdisciplinary STEAM approach with the modern capabilities of artificial intelligence can enhance the effectiveness of vocational education. The main principles of organising such training are outlined – integrity, practical focus, flexibility and a focus on innovation – and the pedagogical conditions for developing professional competencies in the field of digital publishing are defined. Particular attention is paid to the use of AI technologies in editorial and printing processes, specifically in design, typesetting, information processing and personalised learning. An approach to integrating artificial intelligence into the STEAM educational environment is proposed, which promotes the development of creativity, technical thinking and the capacity for innovative activity.*

***Keywords.** AI integration, steam education, methodological rationale, publishing and printing industry, vocational training, digital technologies, artificial intelligence, interdisciplinary approach, educational innovations, competence-based approach.*

Introduction

Modern changes in the publishing and printing industry are due to the development of digital technologies, automation of production processes and the growing role of AI. This requires a reformatting of approaches to training future specialists in the publishing and printing industry. Specialists must possess not only traditional knowledge, but also skills in working with intelligent systems and creatively solving complex tasks. In this regard, the integration of STEAM education with AI technologies as a basis for the formation of interdisciplinary thinking and innovative competence is of particular relevance.

AI-integrated STEAM opens up new opportunities for reformatting the educational process, combining the main elements of scientific, technical, engineering, artistic and mathematical approaches with AI tools. Such an approach contributes to the setting up of an adaptive, practice-oriented learning environment in which students can develop as professionals. At the same time, the implementation of AI in STEAM education requires a clear methodological justification, definition of principles, approaches, and pedagogical conditions that ensure the effectiveness of this process.

The effectiveness of VR tools in higher education institutions is determined by the synergy of methodologically sound design and consideration of the discipline-specific nature of knowledge. Given the technological complexity of developing such systems, the analysis of their functional typology takes on particular importance. It is the classification approach that allows for the optimization of the process of selecting VR solutions, ensuring their appropriateness and effectiveness in the implementation of specific educational models.

The purpose and objectives of the research

The aim of the study is to establish the theoretical foundations and develop methodological approaches for integrating artificial intelligence (AI) tools and immersive technologies (AR/VR/MR) into the interdisciplinary course design process for third-year undergraduate students majoring in G20 “Publishing and Printing,” which will ensure the development of professional competencies in the context of modern digital challenges.

The object of the study is the process of professional training for third-year undergraduate students majoring in G20 “Publishing and Printing” in the context of the digitalization of the educational environment.

The subject of the study is the methodological principles, content, and tools for integrating STEAM elements (in particular AI and immersive technologies) into the structure of interdisciplinary course design as a means of creating interactive media content.

Main part

1 Analysis of current research

In contemporary scientific literature, the issue of virtualizing education is examined from multiple perspectives. In particular, the impact of immersion depth on cognitive development and the effectiveness of educational applications has been analyzed by M. A. Kukhail [7], K. Schott, and S. Marshall [8]. The technical and technological basis of VR systems, their operational methodology, and user interaction tools are presented in the publications of H. Martin-Gutiérrez [10] and A. H. Juman [11]. Alongside the broad possibilities for applying immersive content, researchers (V. Chung, M. Barnett-Cowen) emphasize the need to account for ergonomic factors, particularly the prevention of negative somatic reactions in users [9].

The development of STEM education in Ukraine is currently gaining momentum. The Ukrainian government has developed a series of regulatory documents to ensure the sector’s effectiveness: the approval of the Concept for the Development of Science and Mathematics Education (STEM Education) and the Action Plan for Implementing the Concept for the Development of STEM Education through 2027; approval of the Standard List of Teaching Aids and Equipment for Classrooms and STEM Laboratories [6].

2 Theoretical and Methodological Foundations for the Use of AI and Immersive Technologies in the Publishing and Printing Industry

Modern educational technologies facilitate educators' use of the guiding principle of STEM education-integration (transdisciplinary). To implement educational technology in the teaching process, teachers must create certain optimal conditions, namely: tolerant, interpersonal, democratic interaction that fosters a humanistic and dialogic communication style; a relevant problem-based situation that will stimulate productive, creative activity among learners; the use of interactive, scientific, and design-based teaching methods; and group work that will foster an atmosphere of cooperation, co-creation, and self-realization for each individual [2].

Despite operating under martial law, educators at Ukrainian educational institutions continue to effectively implement modern models for organizing the educational process. Ensuring the high-quality modernization of the learning process requires clear and timely decisions, accessible explanations, and the introduction of innovative forms of education, including the implementation of STEM education within a blended learning model. Modernizing educational content ensures the training of a new generation of specialists capable of adapting to contemporary conditions of social mobility and mastering cutting-edge professional technologies [3].

2.1 A Conceptual Analysis of the Synergy Between Artificial Intelligence and AR/VR Technologies in Training the Next Generation of Specialists.

The current stage of development in the publishing and printing industry is characterised by a rapid blurring of the boundaries between traditional static products and dynamic digital environments. At the heart of this transformation lies the conceptual synergy of the two most powerful technological drivers of our time: artificial intelligence (AI) and immersive technologies (AR/VR/MR).

In this context, artificial intelligence acts not only as a tool for automating routine processes, but as an intellectual core for generating and personalising content. At the same time, augmented and virtual reality technologies provide a fundamentally new plane for its visualisation and perception, transforming the reader or consumer from a passive observer into an active participant in interactive engagement.

For the new generation of specialists in the G20 discipline 'Publishing and Printing', understanding this synergy is becoming a critically important professional skill. The educational challenge lies in the transition from linear training to an integrated learning model, where the technical precision of print production is combined with the algorithmic flexibility of AI and the spatial design of immersive environments.

A conceptual analysis of such interaction allows us to define the theoretical boundaries of the 'new media product', where:

- AI is responsible for intellectual content, adaptability and the speed of creating complex visual assets;
- AR/VR create an immersive interface that extends the physical properties of printed or digital products;

– The STEAM approach provides a methodological framework for integrating these elements into a coherent system within the context of course design.

Thus, examining the synergy of these technologies within the theoretical section is a necessary step towards developing a new educational strategy that meets the dynamic demands of the modern media and publishing industries.

STEAM fosters the development of creative thinking, encourages a keen interest in gaining a deep understanding of the subject matter, and develops critical thinking. As a result, higher education students acquire not only knowledge but also essential skills, a thirst for knowledge, motivation for self-development, and an enthusiasm for the learning process itself.

In [1], data on the use of educational technologies by teachers based on a person-centred approach in the context of implementing STEM education are presented in Table 1. To enable data comparison, comparative analysis and generalisation, the figures are given as percentages (%).

Empirical data confirm the dominance of project-based, group-based and creative-developmental technologies in teaching practice. Respondents emphasise the high didactic effectiveness of collaborative learning, where joint creative activity and the teacher’s facilitative approach act as catalysts for students’ intellectual development. This format of interaction forms the foundation for the implementation of project-based technology, which integrates research with the practical mastery of scientific methods, critical analysis of results, and the development of a holistic scientific worldview in future specialists.

Table 1 – Data on the use by higher education lecturers of educational technologies based on a person-centred approach in the educational process. Compiled on the basis of [1]

Technology area	Key authors and concepts	Proportion of the course project (%)	Functional role in a STEAM context
Project-based learning	J. Dewey, W. H. Kilpatrick (Project Technology)	30%	Basic framework for the course project: from idea to finished media product
Team and group work	I. G. Pestalozzi, J. Dewey (Group activities)	20%	Developing soft skills: role distribution (designer, technologist, prompt engineer)
Creative and developmental	E. M. Ilyin, I. P. Volkov (The Formation of the Creative Personality)	20%	Working with AI tools to create a unique visual style
Research-based	M. V. Klarin, V. V. Bukhvalov (Learning as Research)	10%	Testing AR markers and experimenting with print materials
Cognitive and psychological	L. Vygotsky (Developmental Learning)	10%	Focusing on the ‘zone of proximal development’ when mastering complex software
Humanistic and didactic	Sh. A. Amonashvili (The Pedagogy of Cooperation)	10%	The ‘Teacher–Student’ interaction model as equal researchers
TOTAL		100%	

Overall, STEAM education produces professionals who not only possess in-depth technical knowledge but are also capable of approaching complex problems creatively, adapting to new circumstances and working in multidisciplinary teams. This makes it an extremely important component of the modern education system.

2.2 The theoretical basis for the interaction between artificial intelligence and immersive environments within the context of the interdisciplinary STEAM paradigm.

A theoretical re-examination of the process of training modern specialists in the publishing and printing industry requires a shift away from traditional teaching approaches towards multidimensional learning models. The foundation of such an update is the interdisciplinary STEAM paradigm, which in the digital age is transforming into a complex ecosystem where artificial intelligence (AI) and immersive environments (AR/VR) serve not merely as auxiliary tools, but as integrative hubs of knowledge.

The interaction of AI and immersive technologies within the STEAM approach creates a new theoretical framework, where each element of the acronym takes on specific meaning for a graphic designer:

- Science: Research into machine learning algorithms and the optics of virtual space perception;
- Technology: Practical application of software suites for creating interactive content;
- Engineering: Designing the architecture of interaction between the physical medium (printed publication) and the digital layer;
- Arts: The aesthetics of generative design and visual dramaturgy in an immersive environment;
- Mathematics: Computational logic of prompt engineering and the geometry of 3D modelling.

The theoretical basis for this interaction rests on the principle of technological convergence. In this model, artificial intelligence acts as a ‘generator of meanings and forms’, whilst immersive environments provide a ‘living space’ for these forms. For higher education students, this approach signifies a shift from the reproductive acquisition of knowledge to constructive interdisciplinary design, where the final product is the result of the synthesis of code, algorithm and physical embodiment.

Thus, examining the interrelationship between AI and AR/VR through the prism of the STEAM methodology allows for the formation of a holistic concept of learning that prepares higher education students to work in the conditions of high uncertainty and technological complexity of the modern media market. This creates the necessary conditions for the implementation of complex interdisciplinary course projects that combine traditional print quality with innovative interactivity.

2.3 International practices and domestic trends in the integration of intellectual and immersive content into the educational environment of STEAM-oriented disciplines.

Modern higher education in the field of publishing and printing is undergoing a global transformation driven by the transition to Industry 4.0. An analysis of the global educational landscape shows that leading technology universities are increasingly moving away from narrowly specialised training in favour of comprehensive STEAM-oriented models, where intellectually immersive content becomes the main focus of research and design.

Global practice (in particular, the experience of universities in the US, Germany and the UK) demonstrates a consistent trend towards the implementation of ‘digital twins’ of printing processes and the use of generative artificial intelligence to optimise pre-press preparation. International case studies confirm that involving students in the creation of augmented reality (AR) projects not only enhances technical literacy but also stimulates the development of creative thinking, which is critically important for future media industry professionals.

Positive trends in adapting to these challenges are also evident in the Ukrainian educational landscape. Despite challenging external conditions, domestic higher education institutions are actively integrating elements of immersion into the curricula for third-year undergraduate students (Bachelor’s level) in the G20 specialisation ‘Publishing and Printing’. However, infrastructure limitations and the need to update teaching methods often stand in the way.

The study of experiences in implementing artificial intelligence as a means of ‘intellectual support’ for content development is becoming particularly relevant. Domestic higher education is gradually moving from the sporadic use of digital applications to the systematic application of AI and VR within interdisciplinary projects. This enables third-year students to develop a holistic view of the modern publishing product as a high-tech, multimodal entity.

A comparative analysis of international practices and domestic realities in this section will help identify the optimal ways to integrate innovative technologies into the structure of course design, taking into account both global technological standards and the specific nature of specialist training in Ukraine.

3 Methodology for integrating intelligent and immersive tools into interdisciplinary course design

3.1 Transforming the structure and content of the course project in light of the challenges posed by digitalisation and content interactivity.

The transition of the publishing and printing industry to the ‘Smart Media’ model calls for a radical rethinking of traditional approaches to the practical training of third-year undergraduate students (Bachelor’s degree) in the G20 specialisation ‘Publishing and Printing’. A key stage of this training in the third year is an interdisciplinary course project, which, in today’s context, is no longer merely a test of knowledge of

typesetting or printing technology, but has evolved into a comprehensive study of the life cycle of an interactive product.

The challenges of global digitalisation dictate the need to transform both the structure and the content of the course project. Whereas previously the dominant output was a static paper format (a book, magazine or newspaper), today the focus is shifting towards the creation of a multimodal object that combines a physical medium with a digital interactive layer. This transformation necessitates the expansion of the project's structure to include new stages: from the development of an architecture for immersive interaction to the integration of media assets generated using artificial intelligence.

The content of the course project must be adapted to the following key factors:

- Interactivity as standard: treating the publication not as a closed information system, but as an interface for accessing extended content (AR/VR applications, animated elements);
- Hybrid processes: combining traditional printing standards (colour space, resolution, bleed) with the requirements of digital platforms;
- Algorithmisation of creativity: using AI tools during the stages of concept development, generation of illustrative material and layout optimisation.

The transformation of the course project structure allows students to move beyond a narrowly technological approach and try their hand at being architects of the media space. This creates the conditions for developing a specialist capable not merely of overseeing the printing process, but of designing a holistic interactive user experience, which is a fundamental requirement of the modern media market.

This section analyses how the stages of coursework completion are changing and what new requirements are being placed on the learning outcomes of third-year undergraduate students (Bachelor's level) in the G20 specialisation 'Publishing and Printing' in the context of contemporary technological challenges.

Before integrating STEAM elements, it is necessary to carry out a detailed analysis of the current interdisciplinary course project undertaken by third-year students on the G20 'Publishing and Printing' programme at the first (bachelor's) level of higher education.

It is important to assess the extent to which its content meets modern technological and educational requirements, and to identify key topics and teaching methods. This will help to understand which STEAM elements can organically complement the learning process, and which require substantial revision or improvement.

The assessment of the existing structure and content of the interdisciplinary course project may be based on the following criteria.

1. Analysis of alignment with the curriculum:

- determining the alignment of the content of the interdisciplinary course project with the standards of the G20 specialism 'Publishing and Printing';
- analysis of the cross-cutting competences embedded in the curriculum.

2. Structural analysis:

- verification of the logical structure of the interdisciplinary course project (introduction, theoretical section, practical calculations, conclusions);

- assessment of the balance between theoretical and practical components.

3. Content analysis:

- analysis of the use of modern technologies and methodologies in the publishing and printing process;

- determination of the depth of coverage of the disciplines integrated into the project.

4. Practical significance:

- analysis of the practical value of the interdisciplinary course project (whether it is a realistic project that can be implemented in practice);

- identification of possible areas for improvement.

5. Assessment methods:

- surveying higher education students and lecturers regarding the effectiveness of the interdisciplinary course project;

- analysing reviews and feedback on previous course projects;

- comparison with similar courses at other educational institutions.

This approach allows for a structured analysis and makes the evaluation of the course project more objective.

3.2 Classification and selection of artificial intelligence tools and immersive technologies for the creation of multimedia publications.

Based on the analysis carried out, it is necessary to identify the most effective tools that can be used in the teaching process. These may include:

- Software for 3D modelling and design (AutoCAD, Blender, Adobe Creative Suite);

- Interactive platforms for learning to code (Scratch, Python, JavaScript);

- The use of augmented reality (AR) technologies in the development of print products;

- The integration of machine learning and artificial intelligence to automate typesetting processes and the analysis of text data.

The effectiveness of implementing an interdisciplinary course project in today's environment depends directly on the informed selection of a software and technology stack. The rapid evolution of digital services has led to the formation of a diverse ecosystem of tools, in which generative artificial intelligence (GenAI) models and platforms for developing immersive content (AR/VR/MR) play a key role. For students of the 'Publishing and Printing' programme, it is critically important not only to navigate this diversity but also to select the appropriate tools in accordance with the technological requirements of the publishing product.

Classifying modern tools within the STEAM approach allows software tools to be structured according to their functional purpose.

1. Intelligent tools for generating and processing media assets: neural networks for creating text content and high-quality raster and vector illustrations, as well as AI upscaling tools for preparing high-resolution images for print.

2. Tools for designing immersive interactions: specialised software for creating augmented reality (AR), enabling the integration of digital objects into the physical space of a printed page via marker-based or markerless tracking systems.

3. Integration platforms: environments that ensure synergy between traditional publishing layout and interactive overlays, enabling the creation of a cohesive multimedia experience.

The selection of specific tools for course design should be based on the principles of accessibility, cross-platform compatibility and compatibility with classic printing standards. The choice between professional engines (such as Unity) and cloud-based WebAR solutions, or between different models of diffusion neural networks (such as Midjourney or Stable Diffusion), determines not only the visual quality of the publication but also the architecture of the entire interdisciplinary interaction.

This section proposes a systematisation of current AI and AR tools, adapted to the needs of the educational process, and defines the criteria for their selection to create innovative multimedia publications that meet the contemporary challenges of the media market.

The traditional structure of the interdisciplinary course design project for third-year undergraduates studying the G20 ‘Publishing and Printing’ at the first (bachelor’s) level of higher education is based on a threefold task: developing an artistic and technical concept, calculating technological parameters, and designing the production process with the selection of appropriate equipment. However, in the context of the industry’s digital transformation, this foundation requires the integration of STEAM tools, which allow for the combination of classical engineering precision with the capabilities of artificial intelligence and immersive content.

A comprehensive approach to learning within the context of design is implemented through the following levels of integration.

1. Intellectualisation of pre-press processes (AI-driven Prepress).

Artificial intelligence is integrated not only as a means of generating illustrations, but also as an analytical tool for automating layout checks, optimising page layout and forecasting material consumption.

The use of intelligent algorithms (for example, for image upscaling or colour profile correction) enables third-year students to improve the technical quality of the product whilst minimising the human factor.

2. Design of an immersive augmented reality product (AR-Extension).

A printed publication is no longer merely a printed object. The project now includes a stage involving the development of a ‘digital twin’ of the publication or an AR app. This requires the applicant to possess skills in designing interactive experiences, where the printed page acts as a trigger (marker) to activate immersive content. This stimulates the development of engineering thinking in the context of programming and 3D modelling.

1. Technical calculation for hybrid publications.

The selection of equipment and cost calculation now covers not only the printing cycle (offset or digital printing), but also the resources required to support cloud

services for immersive content. The applicant must justify the choice of paper and inks not only from an aesthetic point of view, but also in terms of technical suitability for reading AR tags with mobile device cameras (taking into account glare, contrast and texture).

2. Synergy of STEAM elements.

Science & Math: calculation of optical parameters and image recognition algorithms.

Technology: use of AI platforms and AR engines.

Engineering: design of a holistic ‘publication – app – user’ system.

Arts: creation of a visual concept where the real and virtual worlds harmoniously complement one another.

Thus, the integration of AI and immersive technologies into an interdisciplinary project enables the transformation of the training of future specialists from ‘technical implementers’ to ‘architects of intelligent media systems’. This ensures that the educational process meets the current challenges of the market, where demand for interactive and personalised publishing solutions is constantly growing.

Such tools help students take a comprehensive approach to book production: from the scientific analysis of materials to technological design, engineering calculations, graphic design and mathematical modelling of processes. This ensures not only an interdisciplinary approach, but also preparation for real-world professional practice.

3.3 Algorithms for combining technical and technological parameters of printing with the artistic logic of artificial intelligence and the mechanics of immersion.

Creating a modern interactive publication requires a shift away from linear design towards the development of complex multidimensional algorithms, where traditional printing standards are interwoven with the computational logic of artificial intelligence (AI) and the functional mechanics of augmented reality (AR). Within the framework of interdisciplinary course-based design, this synthesis emerges not as a collection of disparate actions, but as a unified technological matrix that ensures the integrity of the user’s perception of the product.

The algorithmisation of such a process involves the harmonisation of three critically important vectors.

1. Technical and technological parameters of printing: these form the foundation, encompassing requirements for resolution, colour gamut (CMYK vs RGB), paper types and finishing methods. In the context of immersivity, these parameters take on new significance: for example, the gloss level of the paper surface is now analysed as a factor affecting the stability of AR marker recognition by a mobile device’s camera.

2. The artistic logic of artificial intelligence: the use of generative models (GenAI) introduces an element of intellectual variability into publication design. Students must master ‘prompt engineering’ algorithms – the process of transforming a

verbal concept into a visual asset, which must correspond to the publication's style and the technical requirements of print reproduction.

3. Mechanics of immersion: developing interaction design scenarios where a physical object (a book) becomes a portal to digital space. Here, the algorithm determines the transition logic: from a visual trigger on the page to the activation of a 3D model, audio track or animation in augmented reality.

The synergy of these components within the STEAM approach enables the creation of an algorithmic sequence of actions: from generating unique content using AI, through its technical adaptation to printing requirements, to its final integration into an immersive environment. This approach transforms the course project from an educational exercise into a full-scale study of 'Smart Edition', where every technical parameter of printing is subordinated to the overall logic of interactive communication.

Examining these algorithms reveals the points of intersection between engineering calculations and creative digital technologies, which is a prerequisite for training competitive specialists in the G20 specialisation 'Publishing and Printing'.

Thus, the methodological aspects of integrating such elements are aimed at creating a comprehensive, practice-oriented educational environment that meets the contemporary challenges of professional activity in the field of publishing and printing.

Research results

1 Basic approaches to combining STEAM elements into an interdisciplinary course project.

For the effective integration of technical, artistic and digital technologies into the learning process during a course project on book production, it is necessary to use specific models, methodologies and technological solutions. Let us consider the main approaches to such integration.

1. Project-based learning model.

Essence: Higher education students work in teams to produce a book, going through all the stages: concept → design → technical calculations → selection of equipment → printing.

Tools:

- Technical tools: AutoCAD, Printflow (for process design);
- Artistic tools: Adobe InDesign, Illustrator (for layout and design);
- Digital tools: AR modelling of the production process, automated cost calculations in Excel.

Result: integration of all aspects into a comprehensive project.

2. STEAM laboratory for publishing technologies.

Essence: establishment of a laboratory combining technical, artistic and digital tools.

Components:

- digital printing technologies: process modelling on digital printing presses (Heidelberg Prinect);

- 3D printing and prototyping: use of 3D modelling to create mock-ups of book covers and die-cuts;
- UX/UI design: development of interactive book layouts for digital publications (Figma, Adobe XD).

FabLabs (short for ‘Fabrication Laboratory’) are laboratories that specialise in digital fabrication and robotics. Their main components are computer-controlled machines, such as 3D printers, laser cutters, CNC machines, electronics and tools for working with various materials. The significance of FabLabs based at higher education institutions (HEIs) in STEM (Science, Technology, Engineering, Mathematics) and STEAM (STEM plus Art) education can be considerable and has several aspects. [4]

Result: a combination of traditional publishing processes with modern digital approaches.

3. The ‘Learning Print Factory’ model.

Essence: creating a simulation of real-world printing production.

Stages of work for higher education students:

1. Study of the technological process – examination of printing equipment, calculation of printing parameters.
2. Digital modelling – creation of 3D simulations of printing press operation (SolidWorks, Printflow).
3. Practical implementation – printing and quality control of prints on real equipment.

Outcome: developing an understanding of the actual production cycle and integrating digital technologies into the printing industry.

4. Blended learning model.

Essence: combining face-to-face learning with digital technologies.

Methods: AR simulations of printing processes – modelling the operation of an offset press in AR.

Simulations can teach things that cannot be learnt through lectures or case studies. Here, students are immersed in ambiguous, often contradictory situations that force them to think critically and strategically, make quick decisions and, perhaps most importantly, immediately see the consequences of their actions, and thus learn from their own mistakes rather than those of others. This approach focuses not only on the acquisition of knowledge, but also on the methods of this acquisition, on models and ways of thinking and acting, and on the development of students’ cognitive abilities and creative potential as they solve learning tasks specially organised by the teacher. However, it is worth noting that the bulk of the learning process takes place outside the simulation. Therefore, the necessary learning context is crucial to make the experience gained during the game process meaningful. For the simulation to become part of the learner’s own experience gained during the learning process, there must be a discussion to resolve the problematic issues that arose during the investigation. [5]

Online platforms for testing technological solutions (Heidelberg Prinect Workflow).

Gamification of the learning process – the use of interactive courses for self-directed study of printing technologies.

Result: a flexible combination of different learning formats.

5. Interactive map of the technological process.

Essence: the use of interactive platforms to visualise the entire technological process of creating a book publication.

Tools:

– Miro, MindMeister – creating process flowcharts;

– Notion, Trello – project management and coordination of students’ work.

Result: improved understanding of interdisciplinary connections.

The use of these approaches will enable the synchronisation of technical, artistic and digital aspects within an interdisciplinary course project, as well as making the learning process practice-oriented and closely aligned with the real-world conditions of the printing and publishing industry.

The updated content of the interdisciplinary course project with integrated elements is presented in Table 2.

Table 2 – Revised structure of the course project

INTRODUCTION (Justification of the relevance of using AI and AR in publishing)
1. RESEARCH AND TECHNOLOGICAL SECTION
1.1. Conceptual Framework: Terminology of Interactive and Immersive Publications (AR, VR, Prompt Engineering)
1.2. Psychological Aspects of Immersive Content Perception: Features of Designing Children’s Publications with Augmented Reality Elements
1.3. Methodology for preparing interactive external design: from static covers to AR markers
1.4. Justification for the choice of intellectual and immersive tools: comparison of neural networks (for graphics) and AR platforms (for interactivity)
1.5. Specifics of source data for hybrid publications: tagging of digital content and system requirements for AR
1.6. Selection of printing technology and materials: consideration of the characteristics of AR tag reading (paper gloss, contrast)
2. PRACTICAL AND PROJECT-BASED SECTION
2.1. Visual communication concept: combining original design with AI-generated elements
2.2. Designing an immersive scenario: developing interactions between the printed page and digital objects
2.3. Generating and processing graphic content using AI: methods for creating illustrations and textures
2.4. Developing a publication’s original layout with integrated markers
2.4.1. Technical specifications for layout: parameters for placing AR elements
2.4.2. Additional multimedia layers: preparation of audio, video or 3D content
2.5. Creation of interactive presentation material: demonstration of the publication via a mobile app or virtual preview
CONCLUSIONS

This updated syllabus enables the optimal integration of STEAM elements into the course project, focusing on digital technologies, process automation, an interdisciplinary approach and innovations in publishing.

2 Justification of quality criteria for an interactive course project: from technical excellence to an immersive user experience.

The shift towards producing intelligent and immersive publications as part of the course-based design projects undertaken by third-year students on the G20 ‘Publishing and Printing’ programme at the first (bachelor’s) level of higher education highlights the need to develop valid criteria for assessing learning outcomes. The traditional assessment system, focused primarily on printing technical regulations and typesetting standards, proves insufficient for analysing products containing elements of artificial intelligence (AI) and augmented reality (AR). A modern course project should be assessed as a comprehensive ecosystem, where the technical quality of the printing process is inseparable from the depth of the user experience (UX). This requires the establishment of a multi-level system of criteria covering both the physical and virtual parameters of the created object.

System of comprehensive evaluation criteria

To ensure the objectivity of the assessment of STEAM integration effectiveness, it is proposed to divide the criteria into three main groups:

1. Technological excellence and print quality.

This is the basic level confirming the professional competence of a future printing specialist:

– Compliance with pre-press standards: correct colour profiles, resolution of illustrations (particularly those generated by AI), and accurate bleed settings;

– Technological compatibility with AR: the ability of the chosen paper and printing method to ensure the stable operation of immersive markers (absence of critical glare, adherence to contrast levels for camera reading);

– Quality of AI content reproduction: absence of generation artefacts that may arise when scaling images for large-format printing.

2. Intellectual and creative level (AI integration).

The student’s ability to work with artificial intelligence tools within the STEAM paradigm is assessed:

– Complexity and precision of prompt engineering: the assessment focuses not merely on the presence of a generated image, but on the quality of the author’s prompt, which enabled the achievement of the specified artistic concept;

– Stylistic coherence: how harmoniously AI elements are integrated into the overall design layout of the publication;

– Ethics and copyright: the correct labelling of AI content and justification of its use within the project.

3. Immersive performance and UX design.

The highest level of assessment, determining the success of user interaction with the product:

– Stability of the immersive layer: speed of AR content activation, absence of ‘shaking’ of objects in virtual space, and the logic of transitions between pages and screens;

- Cognitive accessibility (Usability): intuitiveness of the user interface (is it clear where exactly on the page the interactive element is hidden);
- Value of the immersive experience: does augmented reality add new meaning to the publication, or is it merely a decorative element.

Integrated Assessment Methodology

To summarise the results, it is proposed to use a competency matrix, where each group of criteria has its own weighting factor. This allows the assessment to be differentiated depending on the complexity of the task at hand:

- If the project focuses on children’s literature, the criterion of immersive effectiveness (game mechanics) carries greater weight;
- If it is a technical publication, priority is given to technological excellence and the accuracy of visualisation.

Justifying these criteria allows lecturers not only to measure the performance of individual students, but also to analyse the effectiveness of the entire STEAM methodology in the third-year curriculum. This creates reliable feedback for the subsequent adjustment of the content of educational components for third-year students of the G20 specialisation ‘Publishing and Printing’ at the first (bachelor’s) level of higher education.

3 Research into the impact of AI-integrated STEAM methodology on the development of professional and soft skills among higher education students.

The integration of artificial intelligence and immersive technologies within the STEAM approach to course design is transforming not only the technological cycle of publishing but also the professional profile of higher education students. In today’s environment, the G20 specialism ‘Publishing and Printing’ requires graduates to combine technical expertise (hard skills) with versatile personal qualities (soft skills), enabling them to work effectively in a highly dynamic technological environment. Research into the impact of such a methodology on the development of third-year students’ skills allows for an assessment of the pedagogical effectiveness of these innovations and determines the level of readiness of future specialists to meet the challenges of the digital economy.

Transformation of professional skills (Hard Skills).

The integration of AI and AR into educational design expands the traditional set of professional competencies, transforming them into “hybrid skills”.

1. Prompt engineering and visual literacy: The student masters the skill of algorithmic control of neural networks, which requires a clear understanding of composition, color, and technical parameters of the image (DPI, file format, color model).

2. Designing the architecture of immersive interaction: The skill of creating logical connections between physical and digital objects. This requires basic knowledge of programming (scripting in AR applications) and spatial thinking.

3. Technological audit of innovations: The ability to critically assess the quality of content created by AI and its suitability for printing according to state standards (DSTU).

Development of “soft” skills in the context of STEAM.

STEAM methodology, based on the creation of an interactive product, becomes a powerful catalyst for the development of supra-professional skills:

- Critical thinking and analysis: Working with AI teaches the student not to accept the first result obtained, but to analyze it for errors ("hallucinations" of AI), technical defects and aesthetic compliance;

- Adaptability and flexibility (Agility): The rapid change of versions of neural networks and AR platforms teaches applicants to lifelong learning. A 3rd-year student becomes able to quickly master new interfaces, which is a key challenge of our time;

- Creativity and solving complex problems (Problem Solving): Creating an immersive publication is always a challenge that requires non-standard solutions (how to make an AR label readable on a curved book spine or in low light);

- Cognitive empathy: When developing UX design for an immersive product, the student is forced to “put themselves in the user’s shoes,” which develops emotional intelligence and understanding of the audience’s needs.

The following methods can be used to analyze learning outcomes and the impact of STEAM methodology on higher education students.

1. Survey of higher education students:

- Collecting feedback on their experience working on the project;

- Assessing the level of satisfaction with the use of STEAM elements.

2. Comparative analysis of results:

- Comparing the results of students who worked using the traditional methodology with those who used the STEAM approach;

- Assessing the level of creativity, quality of task performance, and practical value of projects.

3. Expert assessment:

- Involving specialists from the publishing and printing industry to assess the quality of the developed projects;

- Analysis of expert feedback on the innovativeness and suitability of projects for implementation.

4. Quantitative and qualitative indicators:

- Assessment of student success using a grading system;

- Analysis of the number of successfully defended projects.

Results of the analysis:

- Increasing the level of interest of higher education students in learning;

- Improving the quality of project implementation through the integration of STEAM elements;

- Developing critical thinking, creativity, and teamwork skills among higher education students.

4 Comprehensive assessment of the effectiveness of implementing innovative technologies in instructional design.

The effectiveness of implementing AI-integrated STEAM methodology in the process of interdisciplinary course design cannot be measured only by traditional academic performance indicators. The specificity of the design object – an interactive publishing product with elements of artificial intelligence and immersiveness – requires the development of a multi-vector monitoring system. Such a system should be based on the principle of scientific objectivity and cover three key levels of assessment: internal-academic (expert), subjective-reflective (student) and external-industrial (stakeholder).

A comprehensive approach to performance assessment allows solving a number of critical tasks.

1. Verification of professional competencies: determining the level of mastery of technical and technological parameters of printing production in synergy with new digital tools.

2. Analysis of the educational experience of applicants: a study of students' satisfaction with innovative teaching methods, which is a direct indicator of their motivation and involvement.

3. Validation of innovative potential: checking the compliance of the created projects with the current demands of the modern media market and the requirements of the digitalization of the industry.

Within the framework of this study, a departure from the “teacher as a single controller” model is proposed in favor of the “multilateral quality audit” model. This allows not only to set a final grade for the course project, but also to obtain in-depth data for correcting the entire STEAM strategy for training higher education applicants of the first (bachelor’s) level of the 3rd year of the G20 specialty “Publishing and Printing”.

The criteria and mechanisms of interaction of all participants in the evaluation process are detailed below, which provides a holistic view of the effectiveness of the implemented innovations in the context of modern technological challenges.

Criteria and mechanisms of interaction of all participants in the evaluation process.

I. Interaction “Teacher - Applicant”: Expert and technological audit.

This is the basic level, where the teacher acts as a professional expert who evaluates Hard Skills and the project’s compliance with industry standards.

Evaluation criteria:

– Technological validity: correctness of preparation of files for printing (issues, overprints, resolution of AI illustrations);

– Immersive communication stability: speed and accuracy of AR marker operation on different types of paper;

– Algorithmic literacy: assessment of "prompt engineering" (how consciously the student controlled AI to achieve the result);

– Interaction mechanism: Portfolio protection: the student demonstrates the "live" interaction of the printed edition and the mobile application.

Technology review: joint analysis of errors in color profiles or 3D models.

At the "Teacher – Student" level, the assessment focuses on objective quality indicators (Hard Skills) and the student's ability to justify their technological solutions. This is a fundamental stage, since it is here that compliance with DSTU and ISO industry standards is checked in synergy with innovations.

The teacher acts as the chief technologist/art director, who checks the project for "viability" in production conditions. It is advisable to conduct the assessment according to four key descriptors.

1. Technological audit of prepress processes (Prepress Quality):

– Correctness of AI content: Checking the generated illustrations for the absence of visual artifacts, noise and compliance with the resolution (300 dpi);

– Color authenticity: Accuracy of conversion from RGB (AI and AR models) to CMYK (printing). Absence of "dropping" of colors into out-of-gamut areas;

– Technical layout: Correctness of setting of bleeds, safe zones, overprints and trapping.

2. Assessment of the intellectual component (AI-literacy):

– Quality of prompt engineering: The teacher analyzes the "prompt journal" (appendix to the project). The student's ability to use specific parameters (style, lighting, angle) to achieve a holistic artistic result is assessed;

– Stylistic integrity: The extent to which the generated elements harmonize with the text block and the overall grid of the publication.

3. Immersive Stability Audit (AR-Functionality):

– Marker Efficiency: Checking the contrast and detail of printed areas that are triggers for AR. Assessing how the choice of paper (matte/glossy) affects reading;

– Interaction Logic: The "immersive scenario" is assessed – whether the appearance of a 3D model or video is justified and understandable to the user.

4. Justification of the choice of materials (Engineering & Science)

Material science approach: The student must prove why this type of paper and the method of binding were chosen for the publication with AR (for example, so that the spread opens as flat as possible for stable camera focus).

Forms of assessment

For an objective audit, the teacher uses the following methods.

1. Criteria matrix (Rubricator): A table where each parameter (from 1 to 10) corresponds to a clear description of the quality.

2. Live testing: A public demonstration of the project, where the teacher personally tests the AR application on a printed copy (or color proof).

3. Technical interview: A short defense, where the student explains how he resolved a technical conflict (for example, how he improved image quality after AI generation).

An example of a rating scale (fragment) is given in Table 3.

Table 3 – Example of a rating scale (fragment)

Criterion	High level (9-10)	Medium level (7-8)	Low level (1-6)
AI Asset Quality	Illustrations without defects, uniform style, high detail	A few artifacts, style somewhat blurry	Low resolution, obvious generation errors
AR Stability	Instant reading, object "attached" to the page firmly	Reading from attempts, slight "shaking" of the model	Marker not recognized or model constantly disappears

The teacher's expert audit guarantees that the student did not just "play with technologies", but mastered them as professional tools, ready for real production. This ensures strict compliance of the STEAM project with the standards of the G20 specialty "Publishing and Printing".

II. Interaction "Applicant – Educational Environment": Reflective monitoring.

At this level, the applicant evaluates his own development trajectory, which allows measuring the growth of Soft Skills.

Assessment criteria:

- Level of professional autonomy: the ability to independently resolve technical conflicts between AR software and layout;
- Creative confidence: subjective feeling of the ability to create a competitive product;
- Cognitive flexibility: the speed of adaptation to updates of AI tools during the project;
- Interaction mechanism: Self-reflection report: a short essay or questionnaire (which we discussed earlier), where the student analyzes his difficulties and achievements.

Peer-review: mutual testing of AR applications by classmates to assess the usability of the interface (UX).

An important component of monitoring is the subjective assessment of applicants, implemented through the questionnaire-reflection method. This allows us to identify not only the level of knowledge acquisition, but also the dynamics of the applicant's professional self-identification. For example, analyzing the answers to Block 3 (Soft Skills) allows us to track the transition from reproductive to productive thinking, which is a key indicator of the success of STEAM education.

The cycle of reflective learning (Kolb Cycle) Fig. 1 is a classic model that explains how an applicant converts practical experience (creating a course with AI and AR) into knowledge. It consists of four stages that go in a circle:

- Concrete experience: Directly implementing the project (working with neural networks, layout);
- Reflective observation: Understanding what has been done (this is where your reflection survey comes into play);
- Abstract conceptualization: Forming new conclusions and theoretical knowledge (understanding how AI interacts with printing);
- Active experimentation: Applying the knowledge gained in subsequent tasks or real work.

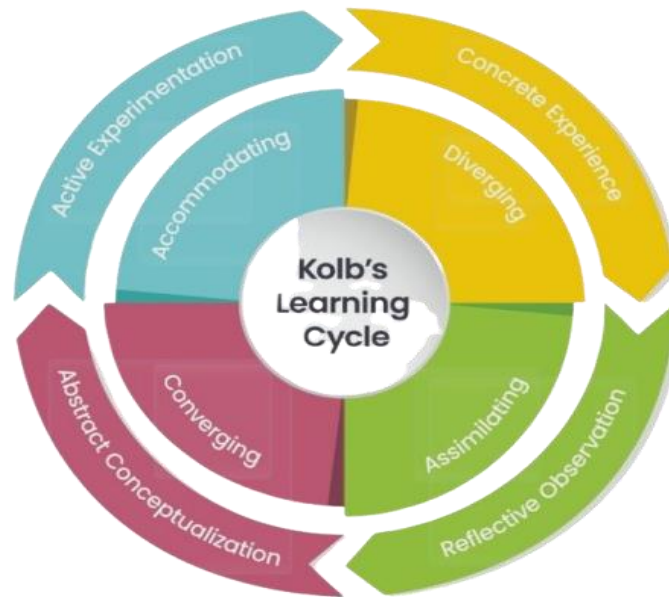


Figure 1 – Reflective Learning Cycle (Kolb Cycle)

III. Interaction “Educational Institution – Industry”: Validation of Marketability.

This level ensures that the project meets modern “technological challenges” through the eyes of external stakeholders (employers).

Evaluation criteria:

- Commercial attractiveness: is there a potential demand for this type of multimedia publication;
- Production realism: is it possible to scale this project in real printing houses with existing equipment;
- Innovation potential: does the product meet the trends of Industry 4.0;
- Interaction mechanism: Public Demo Day: presentation of the best projects to representatives of printing houses and IT companies.

Expert feedback list: receiving feedback from industry practitioners on the relevance of the selected AI tools.

The interaction matrix is presented in Table 4.

Table 4 – Interaction matrix

Participant	Role in the process	Object of evaluation	Tool
Teacher	Controller-expert	Technological quality and STEAM logic	Criteria evaluation matrix
Applicant	Active subject	Own experience and Soft Skills	Reflection questionnaire, UX testing
Stakeholder	Customer-validator	Market relevance and innovation	Expert feedback, Demo session

This three-level model ensures integrity, as it closes the loop: from theory (teacher) to practice (student) and to the real market (industry). This guarantees that the implemented innovations will not remain “artificial”, but will become a real professional base for the future specialist.

Interaction with external stakeholders (representatives of printing houses, publishers, IT companies) allows you to verify the results of STEAM design through

the prism of real market demands. Assessment at this level focuses on three vectors: technological realism, economic feasibility and innovative competitiveness.

Evaluation criteria from industry representatives.

1. Scalability:

- Is the layout suitable for printing on standard equipment (offset/digital)?
- How complex and expensive is the post-printing processing to activate immersive properties (use of varnishes, specific types of paper)?

2. Quality of consumer experience (Market UX):

- How intuitive is the combination of "book + app" for the average buyer?
- Does AR content carry added value that would make the client buy this publication more expensive than the usual one?

3. Technological relevance of the stack (Tech Stack Relevance):

- Do the AI tools and AR platforms chosen by the applicant correspond to those actually used in modern media holdings?
- Assessment of the "purity" of licenses and copyrights for the generated content.

Example of questions for an expert (stakeholder).

1. Are you ready to implement such technology (AI-illustration + AR) in your company?

2. What is the probability that this project will be commercially successful on bookstore shelves (from 1 to 10)?

3. Assess the student's level of training: does he have enough knowledge to work as an "innovative publishing technologist"?

To obtain objective data, it is recommended to use the tools presented in table 5.

Table 5 – Mechanisms and forms of assessment

Evaluation Form	The essence of the mechanism	Monograph output
Review Card	Questionnaire for an industry specialist with short questions about the quality of the project	Statistical indicator of "market readiness"
Demo Day / Pitching	Student presents the project as a startup to the employer council	Assessment of communication skills and the ability to "sell" an idea
Blind Testing	Professional technologists test AR markers without student prompts	Verification of the technical stability of the product
Industry Feedback Session	Roundtable where employers analyze errors in the logic of immersive publishing	Qualitative conclusions for improving the training program

Involving industry representatives in evaluating course projects creates a “feedback” effect. This allows the educational institution to quickly adjust the STEAM methodology in accordance with how the market changes (for example, the transition from one AR engine to another), ensuring the training of specialists who do not require retraining after graduation.

Conclusions

Analysis of learning outcomes using AI-integrated STEAM methodology allows us to assert that applicants demonstrate a higher level of engagement compared to traditional design methods.

The use of artificial intelligence and immersive tools in the course project removes the psychological barrier of "fear of a blank slate" and allows you to focus on the strategic vision of the product.

Thus, the STEAM methodology does not just teach the student to use new programs, but forms an innovative type of thinking. The graduate becomes not just a technical performer, but a creative leader, able to design complex media systems that combine machine intelligence and the emotionality of human art. This is the ultimate goal of modernization of higher education in the context of modern global challenges.

Based on the conducted research and the obtained results, strategic vectors for the development of the methodology for integrating AI and AR/VR tools into the educational process were identified:

1. Technological expansion and intellectualization of the STEAM component:
 - Systematic implementation of generative artificial intelligence models to automate pre-print processes and creative design.
 - Integration of mixed reality (MR) technologies to create hybrid publishing products with a high level of interactivity.
2. Modernization of digital and material and technical infrastructure:
 - Ensuring access of applicants to high-performance computing power and cloud services for training neural networks.
3. Transformation of the teacher's professional profile:
 - Implementation of continuous professional development programs in the field of AI literacy and the development of immersive environments.
4. New generation educational and methodological support:
 - Development of dynamic interactive manuals and online platforms, which themselves are based on the principles of immersiveness and AI support.

References.

1. Горбенко, С., & Василяшко, І. (2023). Технології впровадження STEM-освіти у закладах вищої освіти. Актуальні аспекти розвитку STEAM-освіти в умовах євроінтеграції. (с. 130-132).
2. Завалевський, Ю., Гущина, Н., Василяшко, І., Коршунова, О., & Патрикеева, О. (2021). Створення педагогічних умов для впровадження дослідницького методу навчання з використанням ІТ- та STEM-технологій у закладах загальної середньої освіти. Наукові записки Малої академії наук України, 2-3(21-22), 50-60.
3. Патрикеева, О., Горбенко, С., Лозова, О., & Василяшко, І. (2021). Проблема розвитку природничо-математичної освіти (STEM-освіти). Проблеми освіти, 2(95), 53-67. <https://doi.org/10.52256/2710-3986.2-95.2021.04>.
4. Асманкіна, А.А., & Сотнікова, Т.Г. (2024). STEM та STEAM: науково-практичні тенденції розвитку цифровізації в умовах євроінтеграції: матеріали всеукраїнського науково-педагогічного підвищення кваліфікації. Львів – Торунь: Liha-Pres.

5. Когут, О.І., Кривокульський, Л.Є., & Німко, Н.М. (2023). Цифрові інструменти для впровадження STEM-освіти: Методичний посібник. Тернопіль: ТАЙП.
6. Кравченко, Ю.А., & Симоненко, Т.В. (2024). Цифрові тренди Stem-освіти у системі професійної педагогіки (аналітичний огляд). Освіта і наука в умовах війни (онлайн-проект). Віртуальний читальний зал освітянина ДНПБ України ім. В. О. Сухомлинського. Київ.
7. Kuhail, M.A., ElSayary, A., Farooq, Sh., & Alghamdi, A. (2022). Exploring Immersive Learning Experiences: A Survey. *Informatics*, (9). <https://doi.org/10.3390/informatics9040075>.
8. Schott, C., & Marshall, S. (2020). Full-immersion virtual reality for experiential education: An exploratory user experience analysis. *Australasian Journal of Educational Technology*, (37), 96-110. <https://doi.org/10.14742/ajet.5166>.
9. Chung, W., & Barnett-Cowan, M. (2023). Sensory reweighting: a common mechanism for subjective visual vertical and cybersickness susceptibility. *Virtual Reality*. (27), 2029-2041. <https://doi.org/10.1007/s10055-023-00786-z>.
10. Martín-Gutiérrez, J., Mora, C. E., Añorbe-Díaz, B., & González-Marrero, A. (2017). Virtual Technologies Trends in Education. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*. 13(2), 469- 486. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2017.00626a>.
11. Jumani, A.K., Waqas, A.S, Laghari, A.A, Abro, A., & Abdullah, A.K. (2022). *Virtual Reality and Augmented Reality for Education*. Multimedia Computing Systems and Virtual Reality. Boca Raton. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003196686-9>.

ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОБОТИ З ВЕКТОРНИМИ КОНТУРАМИ У ДИСЦИПЛІНАХ «ШРИФТОВІ ТЕХНОЛОГІЇ» ТА «ОБРОБКА ГРАФІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ»

Бізюк А.В.

к.т.н., доцент, професор, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0001-9830-9206

Андрющенко Т.Ю.

старший викладач, кафедра «Мультимедійних систем і технології»,
Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця
ORCID ID: 0000-0001-8620-5717

Горохова І.М.

асистент, кафедра «Медіасистеми та технології»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0009-0006-1194-4543

***Анотація.** В дослідженні проведено порівняльний аналіз засад викладацької роботи з векторними контурами у Adobe Illustrator та FontLab. Обґрунтовано методичний підхід до інтеграції дисциплін, запропоновано рекомендації для формування перенесення навичок роботи з векторними елементами на основі кривих Безьє у підготовці здобувачів.*

***Ключові слова:** векторні контури, криві безьє, fontlab, adobe illustrator, шрифтовий дизайн, методика навчання.*

Вступ

У підготовці майбутніх фахівців видавничо-поліграфічної галузі ключове місце займає вивчення поліграфічних процесів та цифрових інструментів підготовки видань, зокрема програмного середовища Adobe. Разом з тим важливою складовою професійної підготовки є формування базових навичок дизайну. Структура дизайнерської підготовки традиційно містить три взаємопов'язані складові: шрифтову, колірну та композиційну. Кожна з них має власні принципи, інструменти та методи опрацювання, однак саме шрифтова складова відіграє особливу роль у професійній діяльності видавця та поліграфіста, оскільки текст і його графічна форма є центральним елементом більшості видавничих продуктів.

У дослідженнях викладачів та здобувачів кафедри МСТ ХНУРЕ значна увага приділяється як технологічним, так і методичним аспектам формування професійних компетентностей у сфері дизайну та підготовки фахівців видавничо-поліграфічного профілю. Зокрема, у роботі [1] розглянуто підходи до

автоматизації дизайнерських рішень у веб-середовищі із застосуванням методів машинного навчання та обґрунтовано доцільність інтеграції таких інструментів у навчальний процес. Дослідження Т.О. Трунової та С.О. Зеленєвої [2] акцентує увагу на ролі типографіки, кольору та UX-рішень у проектуванні навчальних веб-ресурсів, підкреслюючи значення візуальної складової для ефективності сприйняття інформації. У роботі Т. С. Сальнікової [3] показано важливість оптимізації контурів шрифтів (хінтінгу) для забезпечення їх коректного відображення, що безпосередньо пов'язано з якістю геометрії векторних форм. Дослідження І.С. Табакової [4] демонструє типові помилки роботи зі шрифтами у графічних системах та пропонує методичні прийоми їх уникнення. У навчальному посібнику Н.Є. Кулішової, Л.О. Яценко та В.П. Ткаченка [5] систематизовано технологічні основи підготовки друкованих видань, що формують базове розуміння процесів створення поліграфічної продукції, в тому числі передача графічних та шрифтових елементів. Узагальнення цих підходів свідчить про те, що якість графічного та шрифтового проектування значною мірою визначається не лише вибором інструментів, але й розумінням принципів побудови векторних форм і контурів, що створює підґрунтя для подальшого аналізу операцій роботи з кривими у різних програмних середовищах.

Особливості роботи зі шрифтом у межах освітньої програми вивчаються в дисципліні «Шрифтові технології». У межах цієї дисципліни шрифт розглядається у двох взаємопов'язаних аспектах. З одного боку, він виступає як цілісна система знаків, що використовується в оригінал-макетах друкованих або цифрових видань. У цьому контексті основна увага приділяється вибору гарнітур, поєднанню шрифтів, читабельності тексту та загальним принципам типографічного оформлення. З іншого боку, шрифт розглядається як система окремих знаків – літер і гліфів, форма яких може бути створена або відредагована у спеціалізованому програмному середовищі.

У сучасних дослідженнях типографіки підкреслюється багатофункціональна роль шрифтів у різних сферах візуальної комунікації. Зокрема, М. Günaу [6] зазначає, що шрифти можуть виконувати не лише інформаційну, а й виразну, іміджеву та комунікативну функції: у логотипах вони сприяють відображенню ідентичності та характеру бренду, у вебсередовищі впливають на сприйняття ресурсу користувачами, а в рекламних матеріалах підвищують ефективність донесення повідомлення. Такий підхід дає підстави розглядати шрифт не лише як носій текстової інформації, а і як повноцінний елемент дизайнерського проектування, функціональні та естетичні характеристики якого визначають якість візуального продукту.

З технічної точки зору більшість сучасних цифрових шрифтів ґрунтується на використанні векторної графіки. Контури літер описуються за допомогою кривих Безьє, що дозволяє точно визначати геометрію знаків і забезпечує можливість масштабування без втрати якості. Тому робота з формою літер у процесі проектування або редагування шрифтів безпосередньо пов'язана з виконанням операцій редагування векторних контурів: переміщення вузлів, керування кривими,

зміна типів вузлів, об'єднання та розділення контурів тощо. Саме ці операції лежать в основі редагування гліфів у сучасних шрифтових редакторах.

Практичне опрацювання форми літер у дисципліні «Шрифтові технології» здійснюється з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для створення та редагування цифрових шрифтів, зокрема редактора FontLab. У лабораторних роботах здобувачі виконують завдання, пов'язані з корекцією контурів літер, редагуванням геометрії штрихів, оптимізацією кривих і підготовкою гліфів до використання у складі шрифтових файлів.

Питання міждисциплінарної взаємодії освітніх компонентів посідає важливе місце в сучасних дослідженнях професійної підготовки дизайнерів. У роботі С.С. Вітвицької [7] наголошується, що комп'ютерна графіка в освітньому процесі має розглядатися не ізольовано, а в тісному зв'язку з рисунком, живописом, композицією, типографією, кольорознавством, історією дизайну та проектуванням. Така інтеграція забезпечує цілісність підготовки майбутніх фахівців і сприяє формуванню у них уявлення про дизайн як комплексну професійну діяльність, у якій художні, технічні та технологічні складові взаємодіють між собою. Отже, міждисциплінарний підхід може розглядатися як важлива умова формування системного професійного мислення здобувачів.

Навички роботи з векторними контурами формуються не лише у дисципліні «Шрифтові технології». На другому курсі бакалаврської підготовки здобувачі також опановують дисципліну «Обробка графічної інформації», у межах якої вивчають універсальні засоби створення та редагування векторної графіки. Практичні завдання цієї дисципліни виконуються у середовищі Adobe Illustrator – одному з найбільш поширених інструментів роботи з векторними зображеннями у сфері графічного дизайну.

У процесі роботи з Adobe Illustrator здобувачі знайомляться з основними принципами побудови векторних форм, зокрема з використанням інструмента Pen Tool, редагуванням вузлових точок, керуванням напрямними кривих Безьє, виконанням трансформацій та булевих операцій над контурами. Таким чином формуються базові навички роботи з векторною графікою, які згодом можуть бути застосовані під час редагування гліфів у шрифтових редакторах.

У наукових публікаціях, присвячених підготовці фахівців у сфері графічного дизайну, дедалі частіше підкреслюється обмеженість традиційних лекційно-ілюстративних форм навчання для розвитку гнучкого мислення та здатності до створення інноваційних рішень. Зокрема, Т. А. Петухова та В. О. Гончаров [8], розглядаючи векторну графіку як інструмент проектної графіки та комп'ютерного дизайну, фактично акцентують увагу на потребі підготовки фахівців, які не лише володіють окремими програмними засобами, а й здатні інтегрувати знання з різних дисциплін, адаптуватися до змін професійного середовища та створювати функціонально обґрунтовані й естетично виразні візуальні продукти. У цьому контексті особливої ваги набуває пошук таких методичних підходів, які забезпечують міждисциплінарне

перенесення практичних навичок і формування цілісної професійної компетентності.

Таким чином, у навчальному процесі виникає ситуація, коли здобувачі працюють із близькими за принципами операціями редагування векторних контурів у різних програмних середовищах. З одного боку, Adobe Illustrator використовується як універсальний інструмент для створення векторної графіки. З іншого боку, FontLab застосовується як спеціалізований інструмент для редагування контурів літер у складі шрифтових гарнітур. Незважаючи на відмінності у функціональному призначенні цих програм, базові принципи роботи з векторними контурами в обох середовищах є спільними.

Педагогічна практика показує, що здобувачі не завжди усвідомлюють цю спільність. Інструменти різних програмних середовищ часто сприймаються ними як окремі та не пов'язані між собою системи. У результаті знання та навички, сформовані під час роботи з векторною графікою в одній дисципліні, не завжди ефективно переносяться у контекст іншої дисципліни. Це ускладнює формування цілісного розуміння принципів редагування контурів і знижує ефективність навчального процесу.

Мета та задачі дослідження

Проблема дослідження полягає у відсутності систематизованого методичного підходу до інтеграції навичок роботи з векторними контурами, які формуються у межах різних дисциплін навчального плану. Зокрема, у навчальному процесі недостатньо узагальнено типові операції редагування контурів та їх реалізацію в різних програмних середовищах, що ускладнює перенесення здобувачами отриманих навичок між дисциплінами «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології».

Метою цього дослідження є систематизація типових операцій роботи з векторними контурами та порівняльний аналіз їх реалізації у програмних середовищах Adobe Illustrator і FontLab з метою визначення методичних підходів до інтеграції відповідних навичок у викладанні дисциплін «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології».

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання таких завдань:

- визначити основні операції редагування векторних контурів, які використовуються у процесі створення графічних об'єктів і шрифтових гліфів;
- проаналізувати особливості реалізації цих операцій у середовищах Adobe Illustrator та FontLab;
- встановити відповідність між інструментами обох програм, що використовуються для виконання аналогічних операцій;
- сформулювати методичні рекомендації щодо інтеграції навичок роботи з векторними контурами у викладанні дисциплін «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології».

Запропонований у дослідженні підхід передбачає розгляд інструментів програмного забезпечення через призму типових операцій редагування контурів. Такий підхід дозволяє не лише порівняти функціональні можливості різних програмних середовищ, але й сформувати методичну основу для інтеграції навчального матеріалу між дисциплінами, що вивчаються здобувачами на другому курсі бакалаврської підготовки.

Основна частина

1 Операційна модель редагування векторних контурів

У процесі створення та редагування векторних зображень, зокрема контурів літер у цифрових шрифтах, користувач виконує низку типових дій, пов'язаних із керуванням геометрією контуру. Незалежно від конкретного програмного середовища, ці дії ґрунтуються на однакових принципах побудови векторної графіки. Контури формуються за допомогою кривих Безьє, які складаються з вузлових точок (nodes) та сегментів кривих між ними. Зміна форми контуру здійснюється шляхом редагування положення вузлів, керування напрямними кривих та виконання різних операцій над сегментами контуру.

У різних програмних середовищах – таких як Adobe Illustrator, FontLab, Glyphs або CorelDRAW – реалізація цих операцій може відрізнитися інтерфейсом або набором інструментів. Однак на рівні базових принципів редагування векторної графіки вони залишаються спільними. Саме тому для методичного аналізу доцільно розглядати роботу з контурами не через призму конкретних інструментів певної програми, а як систему типових операцій редагування.

У межах цього дослідження пропонується операційна модель редагування векторних контурів, яка описує основні групи дій користувача під час створення або корекції векторних форм. Така модель дозволяє узагальнити принципи роботи з векторними контурами та створює основу для подальшого порівняльного аналізу реалізації цих операцій у програмних середовищах Adobe Illustrator та FontLab.

На основі аналізу функціональних можливостей сучасних векторних редакторів можна виділити шість базових груп операцій редагування контурів.

Створення та видалення вузлів контуру. Першою групою операцій є дії, пов'язані зі зміною кількості вузлів, які визначають структуру контуру. Вузли є опорними точками, через які проходять сегменти кривих Безьє. Саме вони задають геометричну структуру форми.

До цієї групи належать операції додавання та видалення вузлів. Додавання вузлів використовується для уточнення геометрії кривої або для формування нових сегментів контуру. Видалення вузлів, навпаки, застосовується для спрощення структури контуру та усунення зайвих точок.

У шрифтовому дизайні ця група операцій має особливе значення. Надмірна кількість вузлів може призвести до погіршення плавності кривих та ускладнює

подальше редагування гліфів. Тому оптимізація кількості вузлів є важливою частиною роботи зі шрифтовими контурами.

Переміщення та редагування вузлів. Друга група операцій пов'язана зі зміною положення вузлових точок. Переміщення вузлів дозволяє коригувати форму контуру без зміни його структури. Це одна з найпоширеніших операцій редагування векторних форм.

У практичній роботі користувач може змінювати положення як окремих вузлів, так і груп вузлів. Переміщення кількох вузлів одночасно дозволяє змінювати пропорції або геометрію окремих елементів контуру.

У шрифтовому проєктуванні переміщення вузлів використовується для корекції пропорцій літер, уточнення товщини штрихів та досягнення оптичної рівноваги елементів гліфа.

Керування кривими Безьє. Третьою групою операцій є керування кривими Безьє, які формують сегменти контуру між вузлами. Кожен вузол може мати одну або дві напрямні (handles), що визначають напрямок і кривизну сегмента.

Редагування цих напрямних дозволяє змінювати плавність кривої, регулювати радіус вигину та контролювати характер переходу між сегментами. Саме керування напрямними є основним інструментом формування плавних контурів.

Для шрифтового дизайну якість кривих має принципове значення. Плавність і гармонійність кривих безпосередньо впливають на візуальне сприйняття літер. Тому правильне керування напрямними є однією з ключових навичок роботи з шрифтовими контурами.

Зміна типів вузлів. Четверта група операцій стосується зміни типу вузла, що визначає характер переходу між сегментами кривих. У більшості векторних редакторів використовуються кілька типів вузлів.

Кутові вузли (corner nodes) формують різкі переходи між сегментами. Плавні вузли (smooth nodes) забезпечують безперервність кривизни між сегментами. Симетричні або тангенціальні вузли дозволяють зберігати однаковий напрямок або довжину напрямних.

Зміна типу вузла дозволяє швидко змінювати характер форми без необхідності перебудови всього контуру. У шрифтовому дизайні ця операція використовується для формування як плавних елементів літер, так і різких геометричних переходів.

Операції з сегментами контуру. П'ята група операцій включає дії, що виконуються над сегментами або частинами контуру. До них належать операції розділення та з'єднання контурів, а також зміна напрямку контуру.

Розділення контуру використовується для створення нових сегментів або для редагування окремих частин форми. З'єднання контурів дозволяє об'єднувати відкриті сегменти у замкнені форми. Зміна напрямку контуру може бути необхідною для правильного визначення внутрішніх та зовнішніх областей форми.

У шрифтовому дизайні ці операції застосовуються під час побудови складних гліфів, які складаються з кількох контурів.

Трансформації контурів. Шоста група операцій охоплює різні види геометричних трансформацій контуру. До них належать масштабування, віддзеркалення, обертання та деформації.

Ці операції дозволяють швидко змінювати розміри або пропорції об'єкта, створювати симетричні елементи та адаптувати форму до заданих параметрів.

У шрифтовому дизайні трансформації часто використовуються для побудови симетричних елементів літер, зокрема вертикальних або горизонтальних відображень частин гліфа.

Розглянуті групи операцій (рис. 1) формують узагальнену операційну модель редагування векторних контурів. Такий підхід дозволяє описувати роботу з векторною графікою на рівні типових дій користувача, незалежно від конкретного програмного середовища.

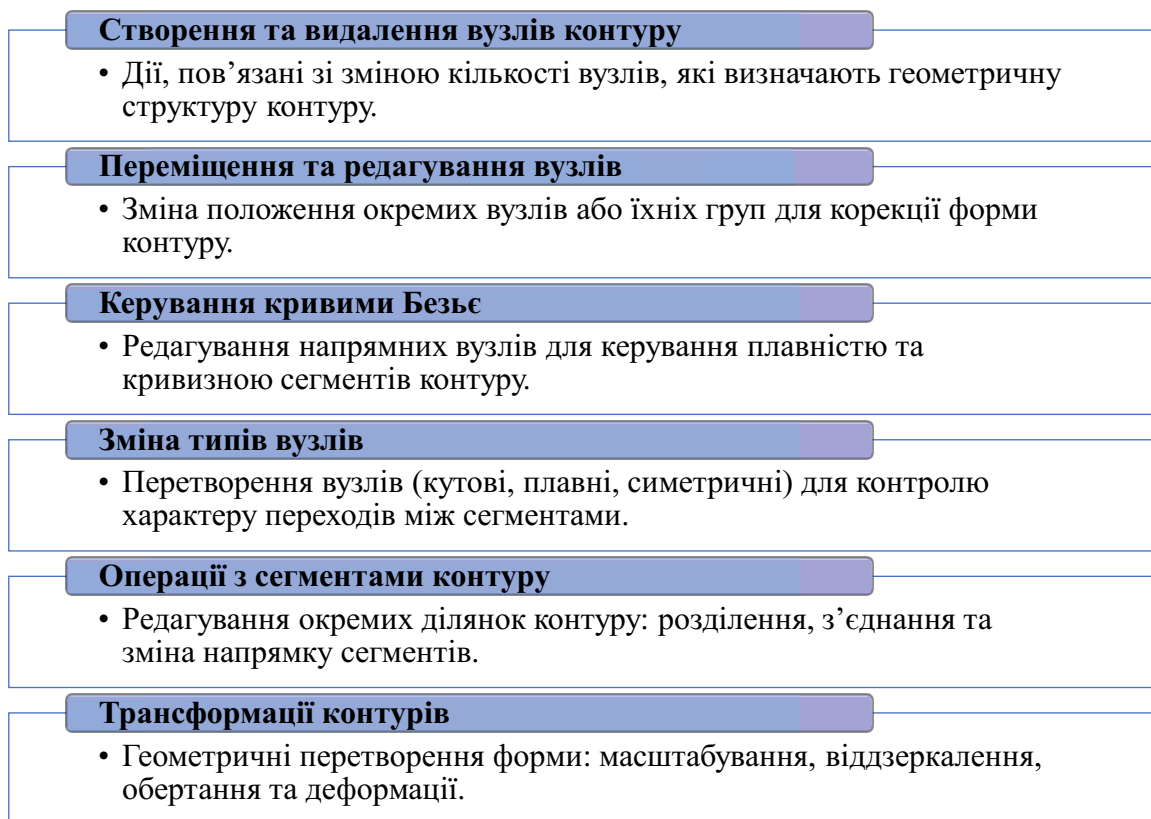


Рисунок 1 – Групи операцій трансформації контурів

Використання операційної моделі редагування векторних контурів дозволяє розглядати роботу з векторною графікою на рівні типових дій користувача, незалежно від конкретного програмного середовища. Такий підхід є методично доцільним, оскільки він відокремлює загальні принципи редагування контурів від реалізації цих принципів у конкретних програмних інструментах. У результаті робота з векторними контурами може бути описана як система базових операцій – створення та редагування вузлів, керування кривими, операції з сегментами та геометричні трансформації.

Саме на рівні цих операцій стає можливим виконати порівняльний аналіз інструментів різних програмних середовищ. Незважаючи на відмінності у призначенні програм Adobe Illustrator і FontLab, більшість операцій редагування контурів у них базується на однакових принципах роботи з кривими Безьє. Відмінності полягають переважно у способах реалізації цих операцій, інтерфейсних рішеннях та додаткових функціональних можливостях, що пов'язані зі спеціалізацією програмного забезпечення.

Adobe Illustrator є універсальним інструментом для створення та редагування векторної графіки, що широко використовується у графічному дизайні, ілюстрації та підготовці макетів. Натомість FontLab є спеціалізованим шрифтовим редактором, у якому аналогічні операції застосовуються до контурів літер і гліфів у межах шрифтового файлу. Незважаючи на різну сферу застосування цих програм, базові дії користувача під час редагування контурів у них залишаються подібними.

Порівняльний аналіз реалізації типових операцій редагування контурів у середовищах Adobe Illustrator та FontLab дозволяє встановити відповідність між операціями редагування та інструментами, які використовуються для їх виконання у кожному з цих програмних середовищ. Узагальнення результатів такого аналізу представлено у таблиці 1, яка демонструє взаємозв'язок між базовими операціями редагування та інструментами відповідних програм.

Таблиця 1 – Типові операції редагування контурів у FontLab та Adobe Illustrator

Типова операція	Реалізація у FontLab	Реалізація в Adobe Illustrator	Особливості для шрифтового дизайну
Створення контуру	побудова контуру гліфа в редакторі гліфів	створення path за допомогою Pen Tool	у шрифті контур повинен бути замкнений і правильно орієнтований
Додавання вузлів	Insert node	Add anchor point	у шрифтових гліфах важливо не створювати зайвих вузлів
Видалення вузлів	Delete node	Delete anchor point	спрощення контуру підвищує якість кривих
Переміщення вузлів	редагування вузлів інструментом редагування	Direct Selection Tool	важливо зберігати симетрію та оптичну рівновагу
Керування кривими Безьє	редагування напрямних вузла	редагування handles вузла	у шрифтовому дизайні важлива плавність кривих
Зміна типу вузла	corner / smooth node	Convert Anchor Point	дозволяє контролювати форму переходу
Редагування сегментів	корекція кривої між вузлами	редагування сегмента кривої	впливає на характер штриха
З'єднання контурів	Join contours	Join paths	використовується при побудові складних форм
Булеві операції	об'єднання або віднімання контурів	Pathfinder / Shape Builder	дозволяє створювати складні гліфи
Трансформації	трансформація гліфа	Transform tools	часто використовується для симетрії

Така таблиця створює методичну основу для перенесення навичок роботи з векторними контурами між дисциплінами «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології». Представлена таблиця демонструє відповідність між типовими операціями редагування векторних контурів та інструментами, які використовуються для їх виконання у програмних середовищах Adobe Illustrator та FontLab. Зіставлення цих операцій показує, що базові принципи роботи з векторними контурами у різних програмних системах є спільними та ґрунтуються на однакових моделях побудови кривих Безьє. Відмінності стосуються переважно інтерфейсної реалізації інструментів, їхнього функціонального групування та окремих спеціалізованих можливостей, зумовлених сферою застосування програмного забезпечення.

Отже, роботу з векторними контурами доцільно розглядати не як набір окремих програмних інструментів, а як систему типових операцій редагування. Такий підхід має важливе методичне значення, оскільки дозволяє сформувати у здобувачів узагальнене уявлення про принципи роботи з векторною графікою. У цьому випадку інструменти конкретних програм сприймаються як різні способи реалізації однакових операцій, що сприяє перенесенню сформованих навичок між різними програмними середовищами та навчальними дисциплінами.

З методичної точки зору особливий інтерес становлять операції, пов'язані з редагуванням вузлових точок, оскільки саме вони визначають геометричну структуру контуру та безпосередньо впливають на форму графічного об'єкта або шрифтового гліфа. Детальніший розгляд цієї групи операцій дозволяє виявити як спільні принципи їх реалізації, так і відмінності, що мають значення для навчання здобувачів роботі з векторними редакторами.

2 Порівняльний аналіз інструментів для роботи з вузлами

Операції створення та видалення вузлів є базовими діями редагування векторних контурів, оскільки саме вузли визначають геометричну структуру форми. Додавання вузлів дозволяє уточнювати кривизну сегментів і деталізувати форму, тоді як видалення вузлів використовується для спрощення контуру та покращення його якості. У контексті шрифтового дизайну ці операції мають особливе значення, оскільки надлишкова кількість вузлів призводить до нерівномірності кривих, ускладнює редагування та може негативно впливати на якість рендерингу шрифту.

У середовищах Adobe Illustrator та FontLab ці операції реалізуються на основі однакових принципів роботи з кривими Безьє. В обох програмах користувач може додавати вузли на сегменті контуру, змінюючи його структуру, а також видаляти вузли без розриву контуру. Основна логіка полягає в тому, що вузол є точкою керування, а зміна їх кількості впливає на форму кривої. Таким чином, на концептуальному рівні дії користувача в обох середовищах є ідентичними.

Разом з тим існують певні відмінності у способах реалізації цих операцій. У Adobe Illustrator додавання вузлів здійснюється переважно за допомогою

спеціалізованого інструмента Add Anchor Point Tool або автоматично при роботі з Pen Tool (рис. 2). Видалення вузлів виконується через Delete Anchor Point Tool або за допомогою клавішних скорочень. При цьому Illustrator орієнтований на універсальну графіку, тому допускає більшу свободу у створенні складних і деталізованих контурів, навіть із великою кількістю вузлів.

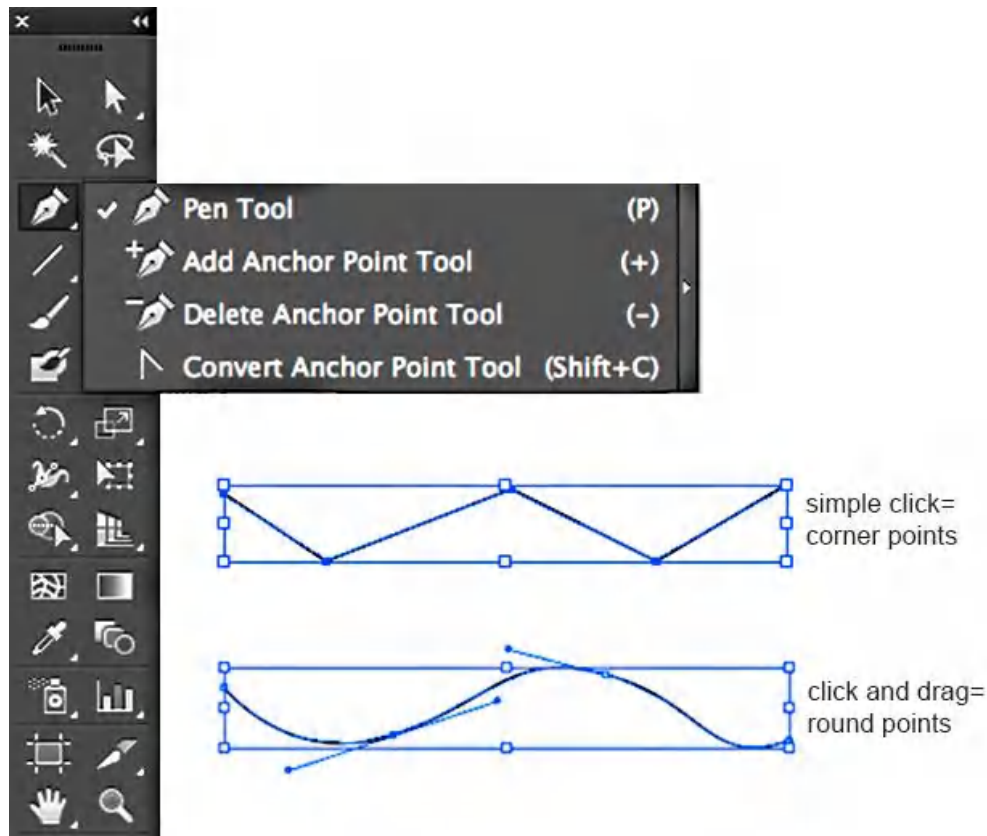


Рисунок 2 – Засоби роботи з вузлами

У FontLab операції додавання та видалення вузлів інтегровані у загальний процес редагування гліфів. Додавання вузлів зазвичай виконується в контексті корекції форми літери, а не як окрема операція побудови. Видалення вузлів у FontLab тісно пов'язане з оптимізацією контурів: програма орієнтована на мінімізацію кількості вузлів при збереженні форми. Крім того, у шрифтовому редакторі важливими є такі аспекти, як правильний порядок вузлів, напрямок контуру та узгодженість структури гліфів, що не є критичними у загальному векторному редакторі.

Надлишок вузлів ускладнює структуру контуру, порушує плавність кривих і робить форму літери менш керованою при редагуванні. Крім того, це може призводити до нерівномірного рендерингу шрифту на різних розмірах і пристроях.

З методичної точки зору доцільно підкреслити, що додавання вузлів є допоміжною операцією, яка має використовуватися обмежено і лише у випадках, коли це дійсно необхідно для уточнення форми. Особливу увагу слід приділяти формуванню навички мінімізації кількості вузлів, що є критично важливою для роботи у FontLab. При викладанні дисципліни «Обробка графічної інформації»

варто акцентувати увагу не лише на технічному виконанні операцій у Illustrator, але й на якості побудови контурів.

Для забезпечення інтеграції знань між дисциплінами доцільно нагадати відповідність операцій у двох програмних середовищах: наприклад, порівняти Add Anchor Point Tool у Illustrator з додаванням вузлів у FontLab (рис. 3). Ефективним методичним прийомом є виконання однакових завдань у двох середовищах із подальшим аналізом отриманих результатів. Це дозволяє сформувати у здобувачів усвідомлення того, що різні інструменти реалізують однакові операції, а також сприяє перенесенню навичок роботи з векторними контурами між різними дисциплінами.

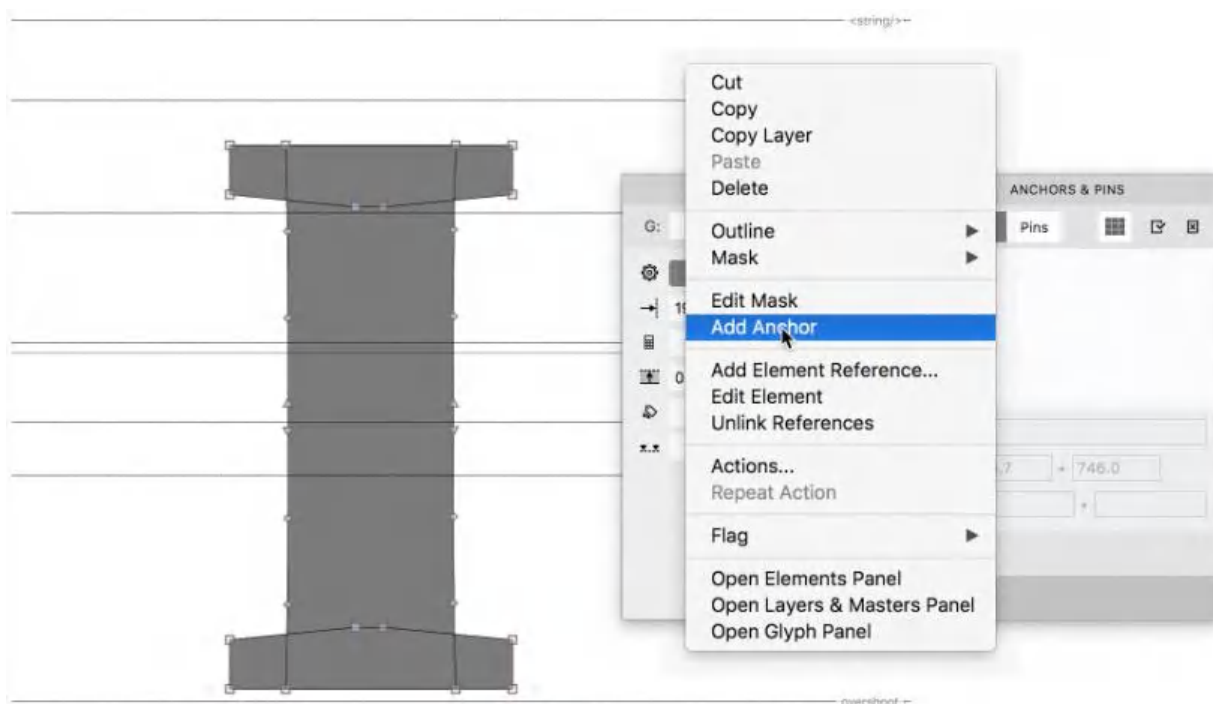


Рисунок 1 – Засоби додавання anchor

3 Робота з кривими Безьє

3.1 Керування напрямними.

Керування кривими Безьє є центральною операцією формування векторних контурів. Сегменти кривих між вузлами визначаються напрямними (handles), які задають напрямок і силу вигину кривої. Саме положення та довжина напрямних визначають плавність переходів між сегментами і характер форми. У роботі з літерами це безпосередньо впливає на візуальну якість штрихів і їхню узгодженість.

У середовищах Adobe Illustrator та FontLab принцип керування кривими є однаковим: користувач змінює положення напрямних вузла для регулювання кривизни сегмента. В обох програмах використовується одна й та сама математична модель кривих Безьє, що забезпечує подібну логіку редагування. Напрявні можуть бути симетричними або незалежними, що дозволяє формувати як плавні, так і ламані переходи.

В Adobe Illustrator робота з напрямними є більш вільною і універсальною: користувач може довільно змінювати довжину та напрямок handles, не обмежуючись жорсткими правилами. Це відповідає задачам ілюстрації та графічного дизайну, де допускається складна і деталізована геометрія.

У FontLab керування напрямними підпорядковане вимогам шрифтового дизайну. Тут важливо дотримуватися узгодженості напрямних, симетрії та логіки побудови контурів. Неправильне розташування handles може призводити до нерівностей кривих, що особливо помітно при масштабуванні або в малих кеглях. Тому в шрифтовому редакторі значно більша увага приділяється контролю плавності та чистоти кривих.

З методичної точки зору доцільно формувати розуміння, що напрямні є основним інструментом керування формою, а не допоміжним елементом. Важливо навчити працювати з мінімально необхідною кількістю вузлів, компенсуючи складність форми за рахунок правильно налаштованих напрямних. Ефективним прийомом є демонстрація однієї й тієї ж кривої з різною конфігурацією handles та аналіз її якості.

3.2 Оптимізація кривизни.

Оптимізація кривизни є процесом приведення контурів до стану, який забезпечує максимальну плавність і візуальну гармонійність форми при мінімальній кількості вузлів (рис. 4). Основними критеріями якості кривих є безперервність, відсутність зламів і рівномірність зміни кривизни.

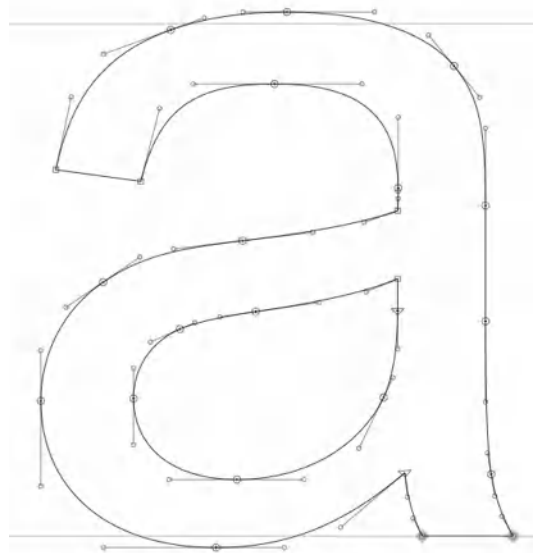


Рисунок 4 – Типовий векторний контур літери

У різних програмних середовищах підходи до оптимізації кривих базуються на однакових принципах. Як у Illustrator, так і у FontLab важливими є такі правила: напрямні повинні бути узгодженими, довжина handles має відповідати характеру кривої, а точки перегину повинні розташовуватися у логічних місцях зміни форми. Таким чином, основи побудови якісних кривих є універсальними.

Водночас у FontLab вимоги до якості кривих є більш жорсткими. У шрифтовому дизайні особливо важливо забезпечити рівномірність кривизни, уникати «заломів» і нерівностей, які можуть бути непомітними у великих розмірах, але проявляються при масштабуванні або в текстовому наборі. У Illustrator ці аспекти не завжди критичні, оскільки в ілюстративній графіці допускається більша варіативність форм.

Ключовим поняттям оптимізації є баланс напрямних – узгодженість їх довжини та напрямку відносно вузла. Порушення балансу призводить до нерівномірного вигину кривої та появи візуальних дефектів. Саме баланс *handles* дозволяє досягти плавного переходу між сегментами без необхідності додавання зайвих вузлів.

З методичної точки зору доцільно формувати чіткі правила побудови «чистих» контурів. Зокрема, варто акцентувати увагу на таких положеннях: мінімальна кількість вузлів, правильне розташування точок перегину, узгодженість напрямних та відсутність зайвих викривлень. Ефективним є порівняння «правильних» і «помилкових» контурів з подальшим аналізом їхніх відмінностей.

Серед типових помилок у навчанні можна виділити надлишкову кількість вузлів, нерівномірну довжину напрямних, неправильне розташування вузлів у точках перегину та відсутність узгодженості між сегментами кривої. Також часто спостерігається спроба компенсувати недоліки кривої додаванням нових вузлів замість корекції напрямних.

Таким чином, робота з кривими Безье вимагає не лише технічного володіння інструментами, але й розуміння принципів побудови якісних контурів. Саме ці принципи мають стати основою інтеграції навичок між дисциплінами «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології».

4 Зміна типів вузлів

Операція зміни типів вузлів є важливою складовою редагування векторних контурів, оскільки саме тип вузла визначає характер переходу між сегментами кривої. Вузол може забезпечувати як плавний безперервний перехід, так і різкий злам форми. Таким чином, зміна типу вузла дозволяє керувати геометрією контуру без зміни його загальної структури та кількості вузлових точок.

У більшості векторних редакторів, зокрема у Adobe Illustrator та FontLab, використовуються три основні типи вузлів: *smooth* (плавний), *corner* (кутовий) та *tangent* (тангенціальний або напівплавний). *Smooth*-вузол забезпечує безперервність кривизни: напрямні розташовані на одній прямій і мають узгоджену поведінку. *Corner*-вузол формує різкий перехід між сегментами, при якому напрямні можуть бути відсутні або незалежні. *Tangent*-вузол займає проміжне положення: напрямні мають спільний напрямок, але можуть відрізнятися за довжиною, що дозволяє зберігати плавність переходу при зміні кривизни (рис. 5-6).

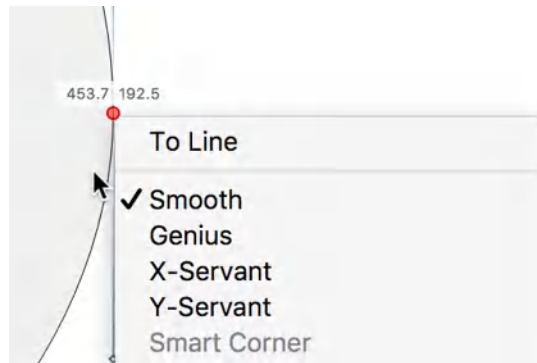


Рисунок 5 – Основні типи вузлів

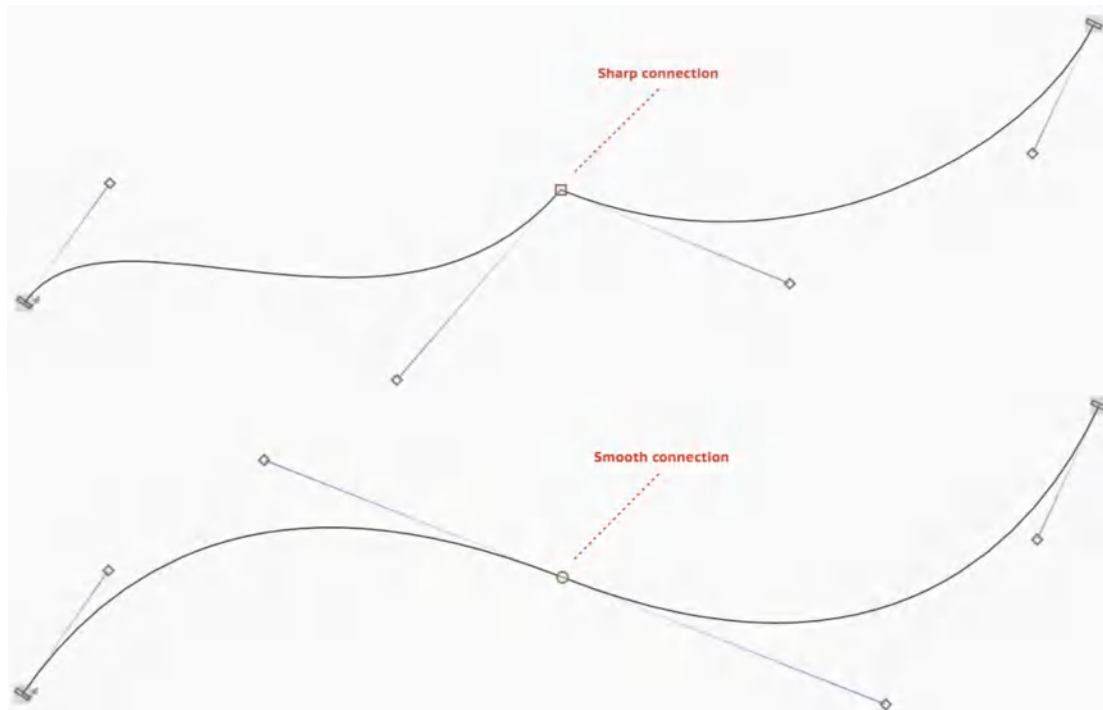


Рисунок 6 – Типове поєднання кривих у вузлах різних типів

У середовищах FontLab та Adobe Illustrator зміна типів вузлів реалізується на основі однакових принципів, що зумовлено використанням єдиної математичної моделі кривих Безьє. В обох програмах користувач може перетворювати вузли між різними типами, змінюючи характер переходу між сегментами кривої. Це дозволяє гнучко керувати формою контуру без необхідності додавання або видалення вузлів.

Разом з тим існують певні відмінності у реалізації цієї операції. В Adobe Illustrator зміна типу вузла зазвичай здійснюється за допомогою інструмента Convert Anchor Point Tool або через маніпуляції з напрямними. При цьому Illustrator орієнтований на гнучкість і допускає довільне комбінування параметрів вузла, що не завжди чітко розмежовується за типами.

У FontLab зміна типів вузлів є більш формалізованою і пов'язана зі структурою гліфа. Тип вузла визначає не лише поведінку напрямних, але й логіку побудови контуру в цілому. У шрифтовому дизайні важливо дотримуватися узгодженості типів вузлів, оскільки це впливає на якість кривих, передбачуваність редагування та коректність інтерполяції шрифтів. Тому у

FontLab більше уваги приділяється правильному вибору типу вузла відповідно до функції конкретної точки в структурі літери.

Порівняльні особливості реалізації типів вузлів у двох програмних середовищах наведено у таблиці 2.

З методичної точки зору важливо навчити здобувачів розрізняти не лише технічні аспекти зміни типів вузлів, але й їхню функціональну роль у формуванні форми. Доцільно пояснювати типи вузлів через характер переходу між сегментами: плавний, різкий або проміжний. Такий підхід є більш зрозумілим, ніж запам'ятовування назв інструментів у конкретних програмах.

Таблиця 2 – Порівняння типів вузлів

Тип вузла	FontLab	Adobe Illustrator
Smooth	Забезпечує плавність кривої, напрямні узгоджені, важлива симетрія	Напрямні співлінійні, але можуть редагуватися довільно
Corner	Формує різкий злам, напрямні незалежні або відсутні	Дозволяє незалежні напрямні або їх відсутність
Tangent	Часткова плавність, напрямні мають спільний напрямок, але різну довжину	Реалізується через часткове редагування handles, не завжди виділяється окремо

Ефективним методичним прийомом є демонстрація одного і того ж контуру з різними типами вузлів, що дозволяє візуально оцінити вплив цієї операції на форму. Також доцільно порівнювати реалізацію зміни типів вузлів у FontLab та Illustrator, підкреслюючи, що в обох випадках йдеться про однакову операцію, реалізовану різними інструментами.

Особливу увагу слід приділяти формуванню навички правильного вибору типу вузла залежно від функції точки в контурі. Типовими помилками здобувачів є використання кутових вузлів там, де потрібна плавність, або, навпаки, надмірне використання smooth-вузлів, що призводить до втрати чіткості форми. Усвідомлене використання типів вузлів є важливою умовою формування якісних векторних контурів, особливо у шрифтовому дизайні.

5 Операції над сегментами контуру

Операції над сегментами контуру охоплюють дії, спрямовані на зміну структури або поведінки окремих ділянок векторного контуру. Якщо робота з вузлами визначає опорні точки форми, то робота із сегментами дозволяє змінювати взаємозв'язок між цими точками та логіку побудови контуру в цілому.

До основних операцій цієї групи належать розрив контуру, об'єднання контурів і редагування сегментів.

Розрив контуру використовується для поділу єдиного контуру на окремі частини. Ця операція дозволяє виділити сегмент для локального редагування або створити відкритий контур із замкненого. У практиці роботи це застосовується, зокрема, при необхідності змінити форму лише частини об'єкта або перебудувати структуру складного контуру.

Об'єднання контурів, навпаки, передбачає з'єднання окремих сегментів або відкритих контурів у єдину замкнену форму. Це дозволяє формувати складні об'єкти з кількох частин, а також відновлювати цілісність контуру після редагування. У векторній графіці ця операція часто використовується разом із булевими операціями, однак на рівні сегментів йдеться саме про топологічне з'єднання контурів.

Редагування сегментів полягає у зміні форми кривої між вузлами без зміни їх кількості. Це може включати переміщення сегмента, зміну його кривизни або локальну корекцію форми. Така операція дозволяє більш точно налаштувати форму без втручання у структуру вузлів.

У середовищах Adobe Illustrator та FontLab зазначені операції базуються на однакових принципах, однак реалізуються по-різному. В Illustrator розрив контуру (рис. 7) може виконуватися за допомогою інструментів Scissors або Knife, а також через команди розділення. Об'єднання контурів здійснюється через команду Join або за допомогою панелі Pathfinder. Редагування сегментів виконується інструментами Direct Selection або Pen Tool, що дозволяє безпосередньо змінювати форму кривої.

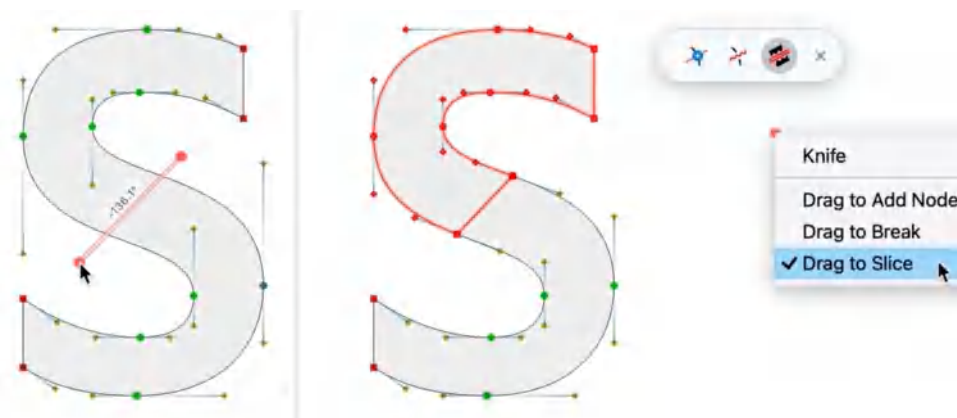


Рисунок 7 – Розрив контуру

У FontLab ці операції інтегровані у процес редагування гліфів (рис. 8). Розрив контуру використовується обмежено і зазвичай пов'язаний із корекцією структури літери. Об'єднання контурів виконується з урахуванням правил побудови гліфів, зокрема правильного з'єднання вузлів і напрямку контуру. Редагування сегментів здійснюється через зміну положення вузлів і напрямних, при цьому особлива увага приділяється плавності кривих.

Порівняння інструментів показує, що Illustrator надає ширший набір універсальних засобів для роботи із сегментами, орієнтованих на довільну графіку. У той же час FontLab обмежує використання деяких операцій або регламентує їх застосування, що пов'язано з необхідністю забезпечення коректної структури шрифтових контурів. Зокрема, у шрифтовому редакторі важливим є правильний порядок вузлів, напрямок контуру та відсутність помилок у топології гліфа.

У шрифтовому дизайні операції над сегментами мають додаткові обмеження і вимоги. Контури літер повинні бути замкненими, правильно

орієнтованими та узгодженими між собою. Неправильне з'єднання сегментів або розриви контуру можуть призвести до помилок у відображенні шрифту або проблем при його генерації. Тому операції розриву і об'єднання контурів у FontLab використовуються обережно і з урахуванням загальної структури гліфа.

З методичної точки зору доцільно пояснювати здобувачам різницю між роботою із сегментами у загальному векторному редакторі та у шрифтовому середовищі. У Illustrator ці операції можна використовувати вільно для досягнення потрібної форми, тоді як у FontLab вони повинні підпорядковуватися логіці побудови шрифту.

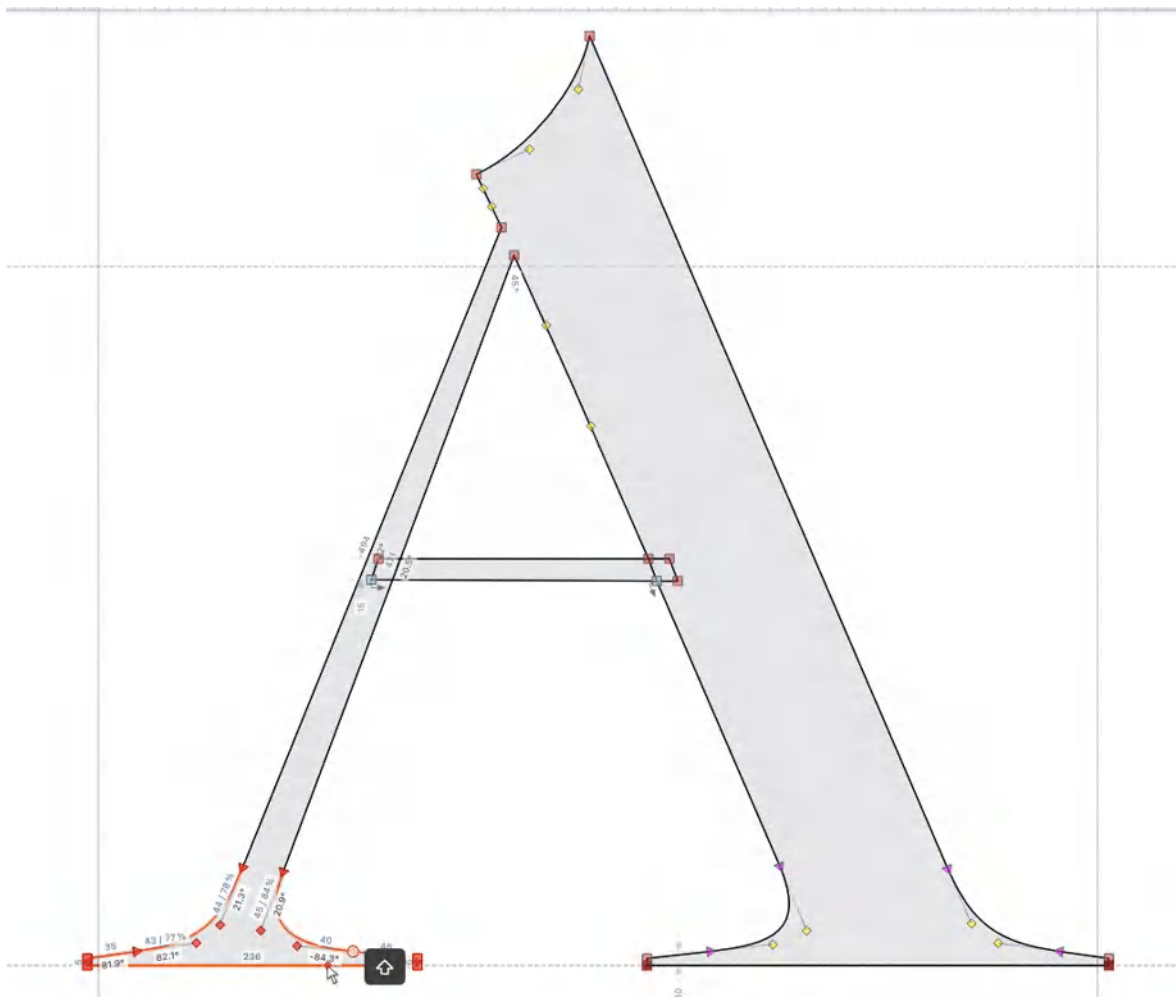


Рисунок 8 – Редагування елемента «засічка»

Ефективним навчальним прийомом є виконання однакових операцій у двох середовищах із подальшим аналізом результатів. Це дозволяє здобувачам усвідомити, що одна й та сама дія може мати різні наслідки залежно від контексту використання. Особливу увагу слід приділяти формуванню навички створення замкнених, логічно побудованих контурів без зайвих розривів і некоректних з'єднань.

Типовими помилками здобувачів є використання розриву контуру без розуміння його наслідків, некоректне з'єднання вузлів, що призводить до порушення форми, а також спроба виправити форму шляхом сегментних

операцій замість корекції кривих і вузлів. Формування правильного розуміння цих операцій є важливим етапом підготовки до роботи зі шрифтовими редакторами.

6 Трансформації та модифікації контурів

Трансформації та модифікації контурів є групою операцій, що дозволяють змінювати геометричні параметри векторних форм без безпосереднього редагування вузлів або сегментів. До основних операцій цієї групи належать масштабування, симетрія (віддзеркалення) та різні види деформацій. На відміну від локального редагування кривих, трансформації впливають на контур як цілісний об'єкт або його вибрану частину, що дозволяє швидко отримувати нові варіанти форми.

Масштабування використовується для зміни розмірів об'єкта із збереженням або без збереження пропорцій. У векторній графіці ця операція є базовою і застосовується як на етапі побудови форми, так і під час її корекції. Симетрія (віддзеркалення) дозволяє створювати дзеркальні копії елементів, що особливо важливо для побудови симетричних форм. Деформації охоплюють ширший спектр операцій – від простого розтягування до складних викривлень форми, які змінюють геометрію контуру.

У середовищах Adobe Illustrator та FontLab ці операції базуються на однакових математичних принципах трансформації координат. В обох програмах користувач може масштабувати, обертати, віддзеркалювати та деформувати об'єкти. Це дозволяє говорити про спільну концептуальну основу трансформацій як групи операцій редагування векторних контурів.

Разом з тим підходи до використання трансформацій у цих програмних середовищах суттєво відрізняються. У Adobe Illustrator трансформації розглядаються як універсальний інструмент роботи з графікою. Користувач може вільно масштабувати об'єкти, застосовувати довільні деформації, комбінувати трансформації та створювати складні графічні композиції. Гнучкість і відсутність жорстких обмежень є ключовою характеристикою цього середовища.

У FontLab трансформації підпорядковані вимогам шрифтового дизайну. Масштабування, віддзеркалення та інші операції застосовуються обережно і, як правило, використовуються для побудови структурно узгоджених елементів гліфа. Наприклад, симетрія може застосовуватися для створення парних елементів, однак після цього зазвичай виконується ручна корекція форми з урахуванням оптичних особливостей. Деформації використовуються обмежено, оскільки вони можуть порушити пропорції штрихів і логіку побудови літери.

Порівняльний аналіз показує, що в Illustrator трансформації є інструментом вільного формоутворення, тоді як у FontLab вони виконують допоміжну функцію і підпорядковуються задачам оптимізації шрифтових контурів. У шрифтовому дизайні важливо не лише отримати потрібну геометричну форму, але й забезпечити її узгодженість із іншими гліфами, що накладає додаткові обмеження на використання трансформацій.

З методичної точки зору доцільно акцентувати увагу здобувачів на різниці між геометричною та оптичною коректністю форми. У Illustrator трансформації часто використовуються для швидкого досягнення візуального результату, тоді як у FontLab необхідно враховувати типографічні закономірності та виконувати додаткову корекцію після застосування трансформацій.

Ефективним навчальним прийомом є виконання однакових трансформацій у двох середовищах із подальшим аналізом результатів. Наприклад, здобувачам можна запропонувати створити симетричну форму в Illustrator і перенести її у FontLab, після чого виконати корекцію для досягнення оптичної рівноваги. Це дозволяє продемонструвати обмеження прямого застосування трансформацій у шрифтовому дизайні.

Типовими помилками здобувачів є надмірне використання деформацій, механічне застосування симетрії без урахування оптичних особливостей та ігнорування необхідності подальшої корекції форми. Формування розуміння ролі трансформацій як допоміжного інструмента, а не основного способу побудови форми, є важливим елементом підготовки до роботи зі шрифтовими редакторами.

Результати дослідження

7 Методичні рекомендації щодо інтеграції дисциплін

7.1 Для викладачів.

Інтеграція дисциплін «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології» доцільна на основі єдиного операційного підходу до роботи з векторними контурами. Замість подання матеріалу як набору інструментів конкретного програмного середовища, навчання варто будувати навколо типових операцій: робота з вузлами, керування кривими, зміна типів вузлів, операції над сегментами та трансформації. Такий підхід дозволяє сформувати у здобувачів узагальнене уявлення про принципи роботи з векторною графікою і створює основу для перенесення навичок між дисциплінами.

Під час викладання доцільно явно пов'язувати зміст двох курсів. Наприклад, при вивченні інструментів Adobe Illustrator варто періодично акцентувати увагу на тому, що аналогічні операції будуть використовуватися у шрифтовому редакторі. Ефективним прийомом є введення узагальнених формулювань на кшталт: «ми зараз вивчаємо не інструмент Pen Tool, а операцію створення і редагування контурів», або «ця дія відповідає зміні структури вузлів, яка буде потрібна при роботі зі шрифтами». Така вербалізація допомагає здобувачам формувати правильні когнітивні зв'язки між дисциплінами.

Використання Adobe Illustrator як підготовчого етапу до роботи у FontLab є методично обґрунтованим. У середовищі Illustrator здобувачі можуть без зайвих обмежень освоїти базові принципи побудови векторних форм, навчитися працювати з кривими Безьє, зрозуміти логіку вузлів і сегментів. Важливо, щоб на цьому етапі увага приділялася не лише технічному виконанню операцій, але

й якості побудови контурів: мінімізації кількості вузлів, плавності кривих, правильному розташуванню точок перегину.

Разом з тим необхідно поступово вводити обмеження, характерні для шрифтового дизайну. Уже на етапі роботи в Illustrator доцільно акцентувати увагу на таких вимогах, як замкненість контурів, узгодженість напрямних, уникнення надлишкових вузлів. Це дозволяє підготувати здобувачів до більш строгих вимог, які вони зустрінуть у FontLab, і зменшити кількість типових помилок при переході до шрифтового редактора.

Ефективною формою організації навчання є використання паралельних або послідовних завдань у двох програмних середовищах. Наприклад, здобувачі можуть спочатку побудувати форму в Illustrator, а потім відтворити або доопрацювати її у FontLab. Такий підхід дозволяє не лише закріпити навички, але й наочно продемонструвати відмінності у вимогах до якості контурів.

Доцільно також використовувати порівняльні таблиці відповідності операцій та інструментів як дидактичний матеріал. Вони можуть бути інтегровані у лекції, практичні заняття або методичні вказівки. Це допомагає здобувачам швидше орієнтуватися у новому програмному середовищі та зменшує когнітивне навантаження при переході між дисциплінами.

З методичної точки зору важливо не перевантажувати здобувачів деталями інтерфейсу конкретної програми, а зосереджувати увагу на принципах роботи. Інструменти слід подавати як реалізацію певних операцій, а не як самоціль. Такий підхід сприяє формуванню більш стійких і переносимих знань, що є особливо важливим у контексті швидкої зміни програмного забезпечення.

Таким чином, інтеграція дисциплін має здійснюватися через узгодження змісту, термінології та методів навчання. Використання операційної моделі редагування контурів як спільної основи дозволяє підвищити ефективність підготовки здобувачів і забезпечити більш цілісне розуміння принципів роботи з векторною графікою та шрифтовими технологіями.

7.2 Для здобувачів.

Перенесення навичок роботи з векторною графікою між дисциплінами «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології» доцільно здійснювати на рівні типових операцій редагування контурів, а не на рівні окремих інструментів програмного забезпечення. Здобувачам варто усвідомити, що незалежно від того, чи використовується Adobe Illustrator або FontLab, вони виконують одні й ті самі базові дії: працюють із вузлами, керують кривими, змінюють типи вузлів, редагують сегменти та застосовують трансформації. Такий підхід дозволяє легше адаптуватися до нового програмного середовища.

Для полегшення переходу між програмними середовищами доцільно використовувати узагальнену відповідність інструментів Adobe Illustrator та FontLab (табл. 3). Така відповідність дозволяє співвіднести знайомі дії у середовищі Illustrator з інструментами шрифтового редактора та швидше адаптуватися до нового інтерфейсу. При цьому важливо розуміти, що наведені відповідності

відображають не повну ідентичність інструментів, а їх функціональну близькість у контексті виконання типових операцій редагування контурів.

Під час переходу від Illustrator до FontLab важливо змінити фокус із візуального результату на якість побудови контуру. Якщо в Illustrator допустимими є різні способи досягнення потрібної форми, то у шрифтовому дизайні ключовими стають чистота кривих, логічна структура вузлів і узгодженість геометрії. Тому здобувачам слід звертати увагу не лише на зовнішній вигляд форми, але й на те, як саме вона побудована.

Таблиця 3 – Відповідність інструментів FontLab та Adobe Illustrator

Функція	FontLab	Adobe Illustrator
Створення контуру	Pen tool	Pen Tool
Редагування вузлів	Node tool	Direct Selection Tool
Додавання вузла	Insert Node	Add Anchor Point Tool
Видалення вузла	Delete Node	Delete Anchor Point Tool
Зміна типу вузла	Convert Node	Convert Anchor Point Tool
Переміщення вузлів	Node tool	Direct Selection Tool
Об'єднання контурів	Join	Join
Булеві операції	Combine / Remove Overlap	Pathfinder
Трансформації	Transform panel	Transform tools
Масштабування	Scale	Scale Tool

Однією з основних рекомендацій є використання мінімальної кількості вузлів. Багато здобувачів на початковому етапі прагнуть досягти точної форми шляхом додавання нових вузлів, однак це ускладнює контур і знижує його якість. Натомість доцільно навчитися працювати з напрямними кривих, використовуючи їх для досягнення потрібної плавності. Правильно побудована крива зазвичай потребує меншої кількості вузлів, але забезпечує кращий результат.

Перед переходом до роботи у FontLab варто звернути увагу на кілька ключових аспектів. По-перше, контури повинні бути замкненими, оскільки відкриті контури не можуть коректно використовуватися у шрифтових гліфах. По-друге, важливо контролювати напрямок контуру, оскільки він визначає внутрішні та зовнішні області форми. По-третє, необхідно забезпечити узгодженість напрямних і уникати різких змін кривизни, які можуть призводити до візуальних дефектів.

Ефективним способом підготовки до роботи у шрифтовому редакторі є самостійне виконання вправ на оптимізацію контурів. Наприклад, здобувачам можна рекомендувати брати готові векторні форми, створені в Illustrator, і спрощувати їх, зменшуючи кількість вузлів та покращуючи плавність кривих. Така практика дозволяє розвинути відчуття форми і краще зрозуміти принципи побудови якісних контурів.

Типовими помилками при переході до FontLab є механічне перенесення підходів із Illustrator, надмірне використання деформацій, ігнорування структури вузлів та відсутність контролю за плавністю кривих. Усвідомлення цих помилок

і цілеспрямована робота над їх усуненням дозволяє значно підвищити якість результатів.

Таким чином, для ефективного перенесення навичок здобувачам необхідно орієнтуватися на принципи, а не на інструменти. Розуміння операційної моделі редагування контурів дозволяє швидше опановувати нові програмні середовища і формує більш глибокі професійні компетентності у сфері векторної графіки та шрифтового дизайну.

Висновки

У межах проведеного дослідження було здійснено порівняльний аналіз інструментів роботи з векторними контурами у програмних середовищах Adobe Illustrator та FontLab на основі узагальненої операційної моделі редагування. Отримані результати показали, що незалежно від функціонального призначення програмного забезпечення, базові операції роботи з векторними контурами – створення і редагування вузлів, керування кривими Безьє, зміна типів вузлів, операції над сегментами та трансформації – реалізуються на основі спільних принципів. Відмінності між середовищами полягають переважно у способах інтерфейсної реалізації, ступені формалізації інструментів та вимогах до якості кінцевого результату.

Встановлено, що у шрифтовому редакторі FontLab зазначені операції мають більш жорсткі обмеження, пов'язані зі специфікою побудови гліфів, необхідністю забезпечення плавності кривих, узгодженості контурів і коректності їх структури. У середовищі Adobe Illustrator ці ж операції застосовуються більш вільно, що відповідає задачам універсальної графіки. Така відмінність підходів визначає необхідність методично обґрунтованого переходу від одного програмного середовища до іншого у процесі навчання.

Ключовим результатом дослідження є обґрунтування доцільності використання операційної моделі редагування векторних контурів як основи інтеграції навчального матеріалу між дисциплінами «Обробка графічної інформації» та «Шрифтові технології». Запропонована модель дозволяє описувати роботу з векторною графікою на рівні типових дій користувача, незалежно від конкретних інструментів програмного забезпечення. Це, у свою чергу, сприяє формуванню у студентів цілісного розуміння принципів редагування контурів і полегшує перенесення навичок між різними програмними середовищами.

Важливою особливістю запропонованого підходу є його методична новизна, що полягає у переході від інструментально-орієнтованого викладання до операційно-орієнтованого. Такий підхід забезпечує більш природну логіку засвоєння матеріалу здобувачами, оскільки навчання будується не навколо конкретних програм, а навколо дій, які вони виконують під час роботи з векторними контурами. Це дозволяє підвищити ефективність навчального процесу та сформувати більш стійкі професійні компетентності.

Крім того, операційна модель має значний дидактичний потенціал, оскільки добре підходить для візуалізації навчального матеріалу. Кожна група операцій може бути проілюстрована наочними прикладами, що сприяє кращому розумінню принципів роботи з векторною графікою. Використання схем, порівняльних таблиць і графічних прикладів дозволяє підсилити сприйняття матеріалу та зробити його більш доступним для студентів.

Перспективи використання результатів дослідження пов'язані з удосконаленням навчальних програм підготовки фахівців видавничо-поліграфічної галузі. Зокрема, доцільним є впровадження операційної моделі редагування контурів у структуру навчальних дисциплін, розробка інтегрованих практичних завдань, а також створення методичних матеріалів, орієнтованих на формування узагальнених навичок роботи з векторною графікою. Такий підхід може бути застосований не лише у межах розглянутих дисциплін, але й у ширшому контексті підготовки дизайнерів та фахівців цифрових медіа.

Таким чином, результати дослідження підтверджують ефективність операційно-орієнтованого підходу до навчання роботи з векторними контурами та його доцільність для інтеграції змісту різних дисциплін у межах освітніх програм бакалаврського рівня.

Список літератури.

1. Бізюк, А.В., Кулішова, Н.Є., Сидоренко, Г.Ю., & Білець, Д.Ю. (2025). Розробка програмного забезпечення для проектування дизайну інтернет-ресурсів з урахуванням вподобань користувачів. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Сучасні тренди: колективна монографія. Т. 1. (с. 137-170). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид». <https://doi.org/10.30837/PMW.2025.T1.137>.
2. Трунова, Т.О., & Зеленева, С.О. (2025). Особливості розробки дизайну навчального веб-сайту. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 2 (с. 120-122).
3. Сальнікова, Т.С. (2021). Про хінтінг шрифтів. Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті. Т. 6. (с. 405-406).
4. Табакова, І.С. (2017). Адаптація шрифту AUTOCAD до вимог ЄСКД. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 1. (с. 228-232).
5. Кулішова, Н.Є., Яценко, Л.О., & Ткаченко, В.П. (2024). Проектування друкованих видань та технологій їхнього виготовлення: навч. посіб. для здобувачів вищої освіти з дисципліни «Основи технології поліграфічного виробництва» та з виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи спеціальності 186 Видавництво та поліграфія. ХНУРЕ. <https://doi.org/10.30837/978-966-659-365-1>.
6. Günay, M. (2024). The impact of typography in graphic design. *International Journal of Eurasia Social Sciences*, 15(57), 1446-1464. <https://doi.org/10.35826/ijoes.4519>.
7. Вітвицька, С.С. (2026). Професійна підготовка майбутніх здобувачів у закладах вищої освіти засобами комп'ютерної графіки. *Наукові перспективи*, 1(55), 1130-1142. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1\(55\)-1130-1142](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-1(55)-1130-1142).
8. Петухова, Т.А., & Гончаров, В.О. (2025). Vector graphics as a tool of project graphics and computer design in graphic design. *Наука і техніка сьогодні*, 8(49), 881-892. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8\(49\)-881-892](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-8(49)-881-892).

РОЗРОБЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ ДОСТОВІРНОСТІ НОВИН ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЇХ ДЖЕРЕЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФОРМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Лозинська О.В.

к.т.н., доцент, кафедра Інформаційних систем та мереж,
НУ «Львівська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-5079-0544

Висоцька В.А.

д.т.н., доцент, кафедра Інформаційних систем та мереж,
НУ «Львівська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6417-3689

Марків О.О.

к.т.н., доцент, кафедра Інформаційних систем та мереж
НУ «Львівська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-1691-1357

Бахмат К.Ю.

здобувач, кафедра Інформаційних систем та мереж
НУ «Львівська політехніка»

***Анотація.** У розділі представлено прототип інтелектуальної системи для автоматизованого виявлення дезінформації та пошуку першоджерел інформації. Обґрунтовано використання трансформерних моделей, зокрема BERT, для класифікації текстових даних. Запропонований підхід базується на методах машинного навчання та опрацювання природної мови і забезпечує ефективний аналіз новин навіть за обмеженого обсягу даних. Застосування підходу, заснованого на оцінці впевненості моделі, підвищує інтерпретованість результатів. Визначено обмеження системи та окреслено напрями її подальшого розвитку.*

***Ключові слова:** дезінформація, машинне навчання, опрацювання природної мови, bert-модель, веб-інтерфейс, трансформерні моделі.*

Вступ

У сучасних умовах стрімкого зростання обсягів цифрової інформації та поширення соціальних медіа проблема дезінформації набуває особливої актуальності. Автоматизовані системи перевірки достовірності контенту та ідентифікації першоджерел стають важливими інструментами забезпечення інформаційної безпеки, підвищення якості аналітичних рішень та протидії поширенню недостовірних даних.

У даному дослідженні представлено процес розроблення та реалізації прототипу інтелектуальної системи, яка функціонує як мінімальний життєздатний продукт і демонструє ключові підходи до автоматизованого

аналізу достовірності новин та пошуку їх першоджерел. Розглянуто архітектурні рішення, принципи побудови модульної структури системи, а також особливості інтеграції компонентів машинного навчання та веб-сервісів.

Окрему увагу приділено варіантам розгортання прототипу, його функціональним можливостям, обмеженням, а також опису користувацького інтерфейсу та сценаріїв взаємодії з системою. Представлені результати дають змогу оцінити практичну реалізацію запропонованих підходів та окреслити напрями подальшого вдосконалення системи.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження полягає у розробленні та реалізації прототипу інтелектуальної системи, призначеної для автоматизованого виявлення дезінформації та ідентифікації першоджерел інформації із застосуванням методів машинного навчання та технологій опрацювання природної мови.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні задачі дослідження.

1. Проаналізувати сучасні підходи та існуючі рішення у сфері автоматизованого виявлення фейкових новин і визначення достовірності інформації.

2. Дослідити методи опрацювання природної мови та архітектури моделей машинного навчання, зокрема трансформерних моделей, для задач класифікації текстів.

3. Спроекувати архітектуру інтелектуальної системи з урахуванням принципів модульності, масштабованості та розширюваності.

4. Розробити модуль виявлення фейкових новин на основі моделі машинного навчання для класифікації текстової інформації.

5. Реалізувати модуль пошуку першоджерел інформації із використанням веб-скрейпінгу та інтеграції із зовнішніми пошуковими системами.

6. Провести аналіз обмежень розробленого прототипу та окреслити напрями його подальшого вдосконалення.

Основна частина

Аналіз літературних джерел та практичних рішень

Проблема автоматизованого виявлення дезінформації та ідентифікації першоджерел інформації є одним із найбільш актуальних напрямів сучасних досліджень у галузі штучного інтелекту, опрацювання природної мови [1] та інформаційної безпеки. Зростання обсягів цифрового контенту та швидкість його поширення в соціальних мережах зумовлюють необхідність розроблення ефективних методів автоматичної перевірки достовірності інформації.

У науковій літературі останніх років значна увага приділяється використанню моделей глибокого навчання для задач класифікації текстів.

Зокрема, трансформерні архітектури, такі як BERT [2], RoBERTa та їх похідні, демонструють високу ефективність у задачах семантичного аналізу тексту, визначення контексту та виявлення прихованих закономірностей у великих текстових корпусах. Ці моделі стали стандартом для багатьох завдань опрацювання природної мови (NLP), включаючи виявлення фейкових новин.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із методами виявлення дезінформації. У роботах [3, 4] розглядаються як контент-орієнтовані підходи (аналіз тексту, стилеметрія, лінгвістичні ознаки), так і контекстні методи, що враховують поширення інформації в соціальних мережах. Встановлено, що комбіновані підходи, які поєднують аналіз змісту та поведінкових характеристик інформації, є більш ефективними порівняно з ізольованими методами.

Важливим напрямом є також дослідження методів пошуку першоджерел інформації. У сучасних роботах застосовуються алгоритми зворотного пошуку, аналіз семантичної подібності та інформаційного ранжування. Зокрема, використання пошукових API та методів веб-скрейпінгу дозволяє автоматизувати процес виявлення першоджерел, хоча такі підходи мають обмеження, пов'язані зі змінами структури веб-сторінок та політиками доступу до даних.

У наукових дослідженнях також розглядаються методи виявлення розповсюджувачів дезінформації, зокрема підходи, що базуються на графовому представленні структури соціальних мереж, які дозволяють аналізувати зв'язки між користувачами та визначати ключові вузли поширення недостовірної інформації [5].

У літературі також активно розглядаються питання побудови архітектури інформаційних систем для аналізу великих обсягів даних. Сучасні рішення базуються на мікросервісній архітектурі, REST API та контейнеризації (Docker), що забезпечує масштабованість і гнучкість систем. Окремо підкреслюється важливість розділення системи на модулі опрацювання даних, машинного навчання та представлення результатів користувачу.

Попри значну кількість досліджень, існує низка невирішених проблем. Серед них – недостатня точність моделей у випадках обмеженого контексту, складність визначення першоджерела для перероблених або агрегованих новин, а також залежність систем від зовнішніх джерел даних. Це зумовлює необхідність подальших досліджень та розроблення інтелектуальних систем, які поєднують методи NLP, машинного навчання та веб-інтеграції.

Додатково до цього, у сучасних прикладних дослідженнях підкреслюється практична реалізація подібних систем, що дає змогу швидко перевіряти гіпотези та оцінювати ефективність архітектурних рішень. Зокрема, розроблена авторами система поєднує два ключові напрями: виявлення дезінформації на основі машинного навчання та пошук можливих першоджерел інформації.

Виявлення дезінформації на основі машинного навчання передбачає глибинний аналіз текстів, виявлення маніпулятивних конструкцій, порушень логіки та стилістичних патернів, що можуть свідчити про спотворення

інформації. Результатом такого аналізу є оцінка достовірності матеріалу та визначення ймовірності його належності до дезінформаційних повідомлень.

Другий напрям стосується модулів реверсивного пошуку першоджерел інформації, які дають змогу встановлювати первинний контекст появи матеріалів та аналізувати їхнє поширення в інформаційному середовищі. Це забезпечує можливість перевірки авторитетності джерел і розуміння трансформації контенту в процесі його розповсюдження.

Таким чином, подібні системи позиціонуються як інструменти підвищення інформаційної грамотності та підтримки користувачів у складному інформаційному середовищі, включаючи журналістів, фактчекерів та дослідників.

Пошук та визначення наявних рішень для виявлення дезінформації.

Першим кроком у розробленні інтелектуальної системи є вивчення наявних рішень, які частково або повністю виконують схожі функції. Такий аналіз дає змогу визначити рівень зрілості ринку, окреслити актуальні тенденції, виявити технологічні обмеження та зрозуміти, які можливості залишаються незадіяними. Порівняння здійснювалося з провідними світовими рішеннями у сфері протидії дезінформації.

Найбільш відомі практичні рішення включають системи, що безпосередньо працюють із виявленням дезінформації, перевіркою фактів або аналізом контенту. До них належать Logically AI [6], Blackbird AI [7], Primer AI [8] та Twitter/X Community Notes [9], які демонструють різні підходи до автоматизації або напівавтоматизації процесу перевірки інформації.

Розроблення та реалізація прототипу інтелектуальної системи для аналізу достовірності новин

У рамках дослідження було здійснено розроблення діючого прототипу інтелектуальної системи для виявлення дезінформації та ідентифікації першоджерел інформації, реалізованого як мінімальний життєздатний продукт. Прототип призначений для демонстрації основних функціональних можливостей системи автоматизованого виявлення дезінформації та ідентифікації першоджерела інформації. Розробка виконана із застосуванням сучасних технологій інженерії програмного забезпечення, що забезпечують можливість подальшого масштабування системи.

Архітектура прототипу побудована на основі сучасного технологічного стеку, що забезпечує продуктивність, масштабованість та підтримуваність. Вибір технологій здійснено з урахуванням вимог до опрацювання природної мови, інтеграції із зовнішніми сервісами та забезпечення надійності.

До основних технологічних компонентів належать:

– мови програмування та фреймворки, серед яких використано Python 3.11, FastAPI, Uvicorn;

– машинне навчання та NLP на основі Transformers, PyTorch, Scikit-learn, Hugging Face;

- веб-скрейпінг з використанням Requests, BeautifulSoup, Selenium;
- бази даних реалізовано у SQLAlchemy, PostgreSQL, Alembic;
- контейнеризація з використанням Docker, Docker Compose;
- тестування проведено із залученням Pytest, Pytest-cov, HTTPX.

Архітектура системи реалізована за принципами модульного проектування з чітким розмежуванням відповідальності. Система включає два основні модулі: аналіз достовірності новин та пошук першоджерела.

Модуль аналізу достовірності новин забезпечує класифікацію текстів за допомогою моделі на базі архітектури BERT. Модуль пошуку джерела здійснює ідентифікацію першоджерела через інтеграцію з пошуковими системами.

Шар інтеграції координує взаємодію модулів, а шар представлення реалізовано у вигляді REST API та веб-інтерфейсу. Система підтримує такі функціональні можливості: автоматизоване виявлення фейкових новин, ідентифікацію першоджерела, комбінований аналіз, навчання моделей та інтерактивну взаємодію з користувачем.

Система підтримує гнучке налаштування через змінні середовища, автоматичну ініціалізацію бази даних та логування. Реалізовано базові механізми моніторингу через спеціальні API-ендпоінти.

Разом з тим, прототип має низку обмежень:

- використання базової моделі BERT без спеціалізованого донавчання;
- нестабільність веб-скрейпінгу як механізму пошуку джерел;
- обмежена масштабованість;
- базовий рівень безпеки;
- обмежені можливості моніторингу.

Ці обмеження планується усунути у повноцінній версії системи.

Опис інтерфейсу користувача та процедура роботи з системою

Прототип інтелектуальної системи реалізує веб-інтерфейс користувача, що забезпечує інтуїтивну взаємодію із функціоналом системи.

Інтерфейс організовано як односторінковий додаток, що включає:

- заголовок системи;
- форму введення даних;
- опції аналізу;
- кнопку запуску;
- секцію результатів.

Користувач може вводити заголовок та текст новини, обирати тип аналізу та ініціювати обробку.

Процес взаємодії включає наступні етапи (рис. 1).

1. Введення тексту.
2. Вибір типу аналізу.
3. Ініціація обробки.
4. Отримання результатів.

Система підтримує кілька сценаріїв:

- класифікація правдивих новин із високою точністю;
- виявлення фейкових новин;
- опрацювання помилок.

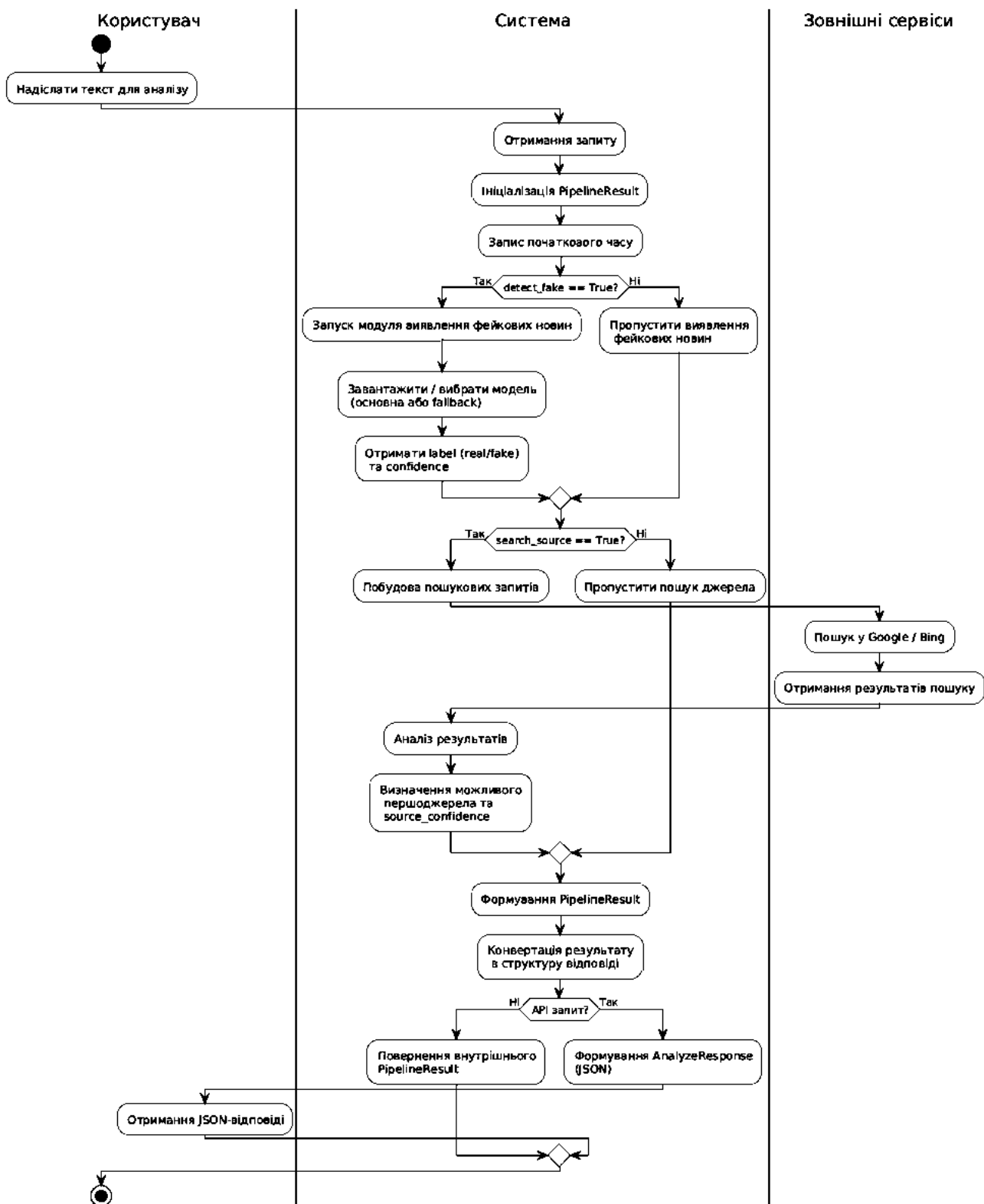


Рисунок 1 – UML-діаграма діяльності основного процесу

Результати досліджень

Результати подаються у зручній візуальній формі із зазначенням F1-метрики та деталізацією ймовірностей.

Інтерфейс має адаптивний дизайн, підтримує візуальну індикацію станів та забезпечує детальне представлення результатів аналізу, що підвищує зручність використання системи.

У межах дослідження було реалізовано експериментальну модель для задачі автоматизованого виявлення дезінформації на основі методів глибокого навчання. Основною метою експерименту було оцінювання ефективності підходу до класифікації новинних текстів із використанням трансформерної архітектури та аналізу текстово-контекстних ознак (рис. 2).

Fake News Detection & Source Search
Система виявлення фейкових новин та пошуку першоджерела

Заголовок новини (необов'язково):
NASA приховало існування іншопланетян на Марсі - розсекречені документи!

Текст новини:
Ексклюзивно! NASA нарешті розсекретило документи, які доводять існування розумного життя на Марсі! Засекречені фотографії, отримані марсоходом Perseverance, показують чіткі ознаки штучних споруд та технологій, які не могли бути створені природою. Дослідники, які бачили ці матеріали, стверджують, що уряд США приховує правду від громадськості вже понад 20 років. Джерела в NASA, які побажали залишитися анонімними, підтвердили, що агентство знає про існування марсіанської цивілізації, але отримало наказ мовчати. Ця інформація змінить все, що ми знаємо про Всесвіт! Деталі тільки на нашому сайті - більше ніде не знайдете!

Виявити фейкову новину Знайти джерело

Аналізувати

Результати аналізу

Виявлення фейкової новини
⚠ ФЕЙКОВА НОВИНА
Впевненість: 94.0%
Фейк: 94.0% Справжня: 6.0%

Пошук джерела
Першоджерело:
Джерело не знайдено
Джерело не знайдено. Спробуйте інший текст або перевірте пізніше.
Впевненість: N/A

Рисунок 2 – Результати роботи системи

На рис. 2 подано інтерфейс роботи інтелектуальної веб-системи та результати автоматизованого аналізу введеного тексту новини.

У першій частині інтерфейсу користувач вводить заголовок та текст новини, після чого активує процес аналізу. У наведеному прикладі введено текст, що містить ознаки дезінформації, пов'язаної з нібито розсекреченням даних NASA про існування позаземного життя. У результатах аналізу система відобразила такі показники: результат класифікації (новину визначено як фейкову), рівень впевненості моделі, який становить 94.0%, ймовірнісний розподіл класів (фейк – 94.0%, справжня новина – 6.0%).

Для проведення навчання та тестування моделі було використано один датасет, що містив збалансовані класи:

- fake news – 100 прикладів;
- real news – 100 прикладів.

Таким чином, загальний обсяг вибірки становив 200 записів.

Датасет є структурований і містить такі атрибути новин:

- title (заголовок);
- text (основний текст);
- url (посилання на джерело);
- top_img (головне зображення);
- author (автор матеріалу);
- source (джерело публікації);
- publish_date (дата публікації);
- images (додаткові зображення);
- canonical_link (канонічне посилання);
- meta_data (метадані сторінки).

Попри наявність багатьох полів, основну увагу в моделі приділено текстовим ознакам (title та text), які є найбільш інформативними для задачі класифікації дезінформації.

Навчання моделі здійснено із застосуванням стандартного підходу для задач бінарної класифікації текстів.

У процесі оптимізації використано:

- функцію втрат Cross-Entropy Loss;
- оптимізатор AdamW з L2-регуляризацією.

Застосування AdamW дало змогу стабілізувати процес навчання та зменшити ефект перенавчання за рахунок коректної реалізації вагової декомпозиції (weight decay). Додатково використано механізми адаптивного навчання:

- поступове збільшення learning rate на початкових етапах (warm-up strategy);
- подальше обмеження градієнтів (gradient clipping) для стабілізації оновлення ваг;
- навчання малими пакетами (mini-batch training);
- валідація після кожної ітерації.

Для оцінювання якості моделі використано F1-метрику як найбільш збалансований показник для задач класифікації, особливо у випадках потенційної диспропорції помилок першого та другого типу.

Також у процесі навчання застосовано ймовірнісну оцінку впевненості моделі (confidence-based evaluation), що дає змогу інтерпретувати вихід моделі як ступінь її впевненості у прийнятому рішенні. Такий підхід підвищує інтерпретованість результатів і є важливим для практичних систем аналізу інформації.

Отримані результати свідчать про високу впевненість моделі у класифікації тексту як недостовірного, що відповідає характеру навмисно сенсаційного та маніпулятивного контенту, представленого у вхідних даних.

Додатково в межах другого функціонального блоку системи – пошуку першоджерела інформації – було здійснено спробу реверсивного пошуку відповідного джерела. Результат роботи модуля показав відсутність достовірного першоджерела (“джерело не знайдено”), що є типовим для фейкових новин, які не мають підтвердження в авторитетних інформаційних ресурсах.

Таким чином, система продемонструвала коректну роботу обох основних модулів: класифікації тексту та пошуку першоджерела, що підтверджує ефективність запропонованого підходу до автоматизованого аналізу інформації.

У процесі навчання система автоматично зберігає найкращі ваги моделі відповідно до значення F1-метрики. Додатково реалізовано механізм ранньої зупинки (early stopping), який припиняє навчання у випадку, якщо показники якості перестають покращуватися протягом певної кількості ітерацій.

Такий підхід дав змогу уникнути перенавчання моделі, скоротити час навчання та забезпечити стабільність результатів.

Отримані результати свідчать про те, що навіть при використанні відносно невеликого та збалансованого датасету модель здатна навчатися розрізненню між справжніми та фейковими новинами на основі текстових ознак.

Застосування підходу, заснованого на оцінці впевненості моделі, дало змогу додатково інтерпретувати результати моделі у вигляді ймовірнісної оцінки достовірності, що є важливим для практичних систем аналізу інформації, орієнтованих на кінцевого користувача.

Висновки

У дослідженні представлено розроблений прототип інтелектуальної системи, що реалізує функції автоматизованого виявлення дезінформації та пошуку першоджерел. Проаналізовано наукові підходи до виявлення фейкових новин, визначено доцільність використання трансформерних моделей, зокрема архітектури BERT. Запропонований авторами підхід базується на використанні сучасних методів машинного навчання та опрацювання природної мови, що дало змогу забезпечити ефективну класифікацію текстових даних.

Експериментальна частина дослідження продемонструвала, що навіть за умов використання обмеженого за обсягом датасету (200 прикладів) модель здатна забезпечити достатній рівень точності класифікації. Застосування підходу, заснованого на оцінці впевненості моделі, дало змогу підвищити інтерпретованість результатів та надати користувачу додаткову інформацію щодо надійності прогнозів.

Разом з тим, дослідження виявило низку обмежень, зокрема використання невеликого датасету, відсутність спеціалізованого донавчання моделі на доменно-орієнтованих даних, а також обмеженість механізмів інтеграції із зовнішніми сервісами. Це визначає перспективні напрями подальших досліджень, серед яких – розширення навчальної вибірки, інтеграція з соціальними платформами та підвищення рівня безпеки і масштабованості системи.

Подяка. Дослідження було проведено за грантової підтримки Міністерства освіти і науки України «Методи та засоби виявлення дезінформації у соціальних мережах на основі технологій глибинного навчання» в рамках проекту № 0125U001852.

Список літератури.

1. Бондаренко, О.В., & Ковальчук, І.О. (2021). Методи обробки природної мови в задачах аналізу текстової інформації. Наукові праці НУ «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології, 5(12), 45-52.
2. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 4171-4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>.
3. Sharma, K., Qian, F., Jiang, H., Ruchansky, N., Zhang, M., & Liu, Y. (2019). Combating fake news: A survey on identification and mitigation techniques. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 10(3), 1-42. <https://doi.org/10.1145/3305260>.
4. Zhou, X., & Zafarani, R. (2020). A survey of fake news: Fundamental theories, detection methods, and opportunities. *ACM Computing Surveys*, 53(5), 1-40. <https://doi.org/10.1145/3395046>.
5. Лозинська, О.В., Марків, О.О., & Висоцька, В.А. (2025). Метод виявлення розповсюджувачів дезінформації на основі графового представлення структури соціальної мережі. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 11 (42), 70-78.
6. Logically AI. (n.d.). AI-powered misinformation detection platform. <https://logically.ai/>.
7. Blackbird.AI. (n.d.). Narrative intelligence and risk detection platform. <https://blackbird.ai/>.
8. Primer AI. (n.d.). AI-powered text and intelligence analysis platform. <https://www.primer.ai/>.
9. X. (n.d.). Community Notes: crowdsourced context system. <https://x.com/i/communitynotes>.

FEATURES OF EARLY DIAGNOSTICS OF MULTIMEDIA CAMPAIGN EFFECTIVENESS IN GOOGLE ADS

Chebotarova I.

Senior Lecturer, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0003-0105-4484

Manakov V.

PhD in Engineering, Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0002-7410-5409

Artakov M.

Marketer, INDUSTRIAL AGENCY, LLC
ORCID ID: 0009-0007-7844-7047

Hrozian Ya.

Founding Designer, Lumos AI, San Francisco, California, USA
ORCID ID: 0009-0008-9389-6411

***Abstract.** The work examines the specifics and key stages of developing multimedia advertising campaigns, as well as modern approaches to their evaluation. A set of key performance indicators (KPIs) for assessing multimedia campaigns at different stages is defined, along with the specifics of using automated bidding strategies for launching such campaigns.*

In the experimental part, a methodology for early diagnostics of the effectiveness of multimedia campaigns for a construction materials store using Google Ads tools is developed. This methodology allows the detection of early signs of low performance and supports decision-making on optimizing creatives, audience targeting, and communication channels.

To implement the methodology, a psychographic analysis of the target audience was carried out and advertising materials were developed.

***Keywords:** multimedia advertising campaign, construction materials, google ADS, early diagnostics, effectiveness, metrics, segmentation, banner.*

Introduction

The modern digital advertising market is characterized by intense competition, high campaign costs, and substantial uncertainty of results. Advertisers often learn about ineffectiveness only after weeks or months, once the budget has already been spent, which leads to wasted expenditure. To detect campaign problems at the very start of a launch – for example, during the first week – it is necessary to develop a methodology for early diagnostics that will allow optimal corrective actions to be applied to the campaign. These may include adjustments to banners, the landing page, the target audience, or communication channels, which contributes to significant cost reduction and higher ROI. An effective tool here is not only monitoring key campaign indicators but also the use of automated Google Ads strategies.

This approach makes it possible to identify key problems at the very initial stages, particularly during the first seven days of operation, and to quickly introduce the necessary changes. Adjustments may concern creatives, landing pages, targeting settings, or the selection of advertising placements, which helps reduce unnecessary expenses and increase ROI.

Continuous monitoring of key metrics and the application of automated Google Ads strategies – which optimize impressions, bids, and reach algorithmically – plays an important role in this process [14, 15].

For the construction materials segment, where the customer journey to purchase is longer and users repeatedly return to product search, automated strategies are of particular value. They ensure a smooth development of the decision-making funnel, allow for more accurate targeting of the audience, and enable a more rational allocation of the advertising budget.

Automated Google Ads strategies are a key tool for campaign optimization in the display network, since they allow Google's algorithms to independently determine optimal bids, ad formats, and audience segments [16]. This is especially important for products with a long decision-making cycle, including construction materials, where users go through several stages of engagement – from initial interest to a final inquiry or purchase.

The development of an effective methodology for early diagnostics of a multimedia advertising campaign is possible only with the use of modern tools – for example, offline conversions, modern mathematical models for predicting user behavior, and automated Google Ads strategies.

This determined the relevance of the presented research. The research was conducted using the real projects of Artakov M., a certified specialist in search and shopping advertising in Google Ads.

An important methodological aspect of the research is the design of diagnostic interfaces – software solutions that transform the behavioral signals of a campaign into a basis for corrective decision-making already at the early stages of its operation. This area constitutes the field of professional activity of the founding designer of Lumos AI (Hrozian Ya., San Francisco, California, USA), a company that develops platforms for evaluating the effectiveness of artificial intelligence systems in the medico-biological field and healthcare. Within this practice, experience has been accumulated in designing interfaces for detecting leading indicators of declining AI-model performance under conditions of limited and noisy data. Methodologically, this approach is related to the task of early diagnostics of multimedia campaigns: in both cases, the designer's task is to transform fragmentary performance indicators into a clear and actionable decision-making tool. This interdisciplinary experience was taken into account when formulating the requirements for the methodology's prototype testing tools (see section 5).

Purpose and objectives of the study

The purpose of the work is to develop a methodology for early diagnostics of the effectiveness of multimedia campaigns for a construction materials store within the Google Ads system. This methodology should make it possible, at the initial stages of a campaign, to detect signs of low performance and to make decisions on optimizing advertising materials, audiences, and communication channels for the construction materials store.

The object of the study is the process of evaluating the effectiveness of advertising campaigns in the Google Ads environment.

To achieve the stated purpose, the following objectives were addressed:

- analysis of modern approaches to evaluating the effectiveness of advertising campaigns in Google Ads;
- identification of a set of key indicators that may signal the effectiveness or ineffectiveness of a multimedia campaign at its early stages;
- development of criteria for «warning signals» in the dynamics of advertising metrics;
- development of an early-diagnostics methodology that combines analytical indicators and visual elements;
- implementation of prototype tools for testing the methodology;
- development of multimedia banners taking into account the psychological characteristics of consumers;
- modeling of the financial funnel;
- approbation of the developed methodology using real Google Ads campaigns as examples;
- development of recommendations for the client.

Main part

1 Analysis of the literature on the subject of the work

An analysis of the literature on the subject of the study confirmed its relevance. Practical marketing advice in many publications emphasizes that real-time campaign monitoring makes it possible to detect deviations and respond immediately, which leads to reduced wasteful budget spending. Article [1] shows that bounce rate metrics and Click-Through Rate (CTR) have a significant correlational impact on the Quality Score of Google advertising campaigns. A high bounce rate alone may already warn of a likely decline in ad quality. This review demonstrates that modern deep-learning-based models successfully predict CTR from early indicators of user interaction, which can be used as one element of early warning.

The research by the authors of [2] proposes the use of a Text Strength Indicator (TSI), which predicts CTR based on ad text and finds similar ads with high CTR for comparison. This provides an example of how weak ads can be identified «early» by their text and quickly corrected.

In paper [3], a simple linear regression is used to predict CTR based on the advertising context and impression characteristics. This shows that even basic statistical models can give early indications of a potentially weak campaign result.

The authors of article [4] propose an updated ranking model for the initial stages of an advertising campaign that takes into account several components (clicks, ad quality) and helps improve the quality of ad selection at the early stages of the campaign.

Analysis of the literature has shown that approaches to early diagnostics of advertising campaign effectiveness already exist in the literature, but they are often:

- oriented toward search ads more than toward multimedia or banner ads;
- subject to a «cold start,» that is, limited data at the beginning of campaigns;
- pay little attention to a comprehensive approach that would combine several indicators (CTR, bounces, time on site, scroll depth) and conditions of production/budget/format.

2 Features of developing multimedia advertising campaigns

Display advertising is an online promotion tool that uses various multimedia formats: banners, video, animation, interactive ads. Owing to its visual expressiveness and the diversity of formats, it easily attracts users' attention, stimulates their interaction, and helps form stable brand associations [5, 6].

Modern technologies make it possible to place display ads in the Google Display Network, on YouTube, in Google Maps, Gmail, on social networks, and in mobile applications. This ensures accurate reach to the target audience, taking into account their interests, behavior, and online activity.

Main formats of display advertising [7, 8]:

- banner advertising. One of the most flexible and effective formats. It combines vivid design, a short message, and a clear call to action. Regular testing of visuals and copy makes it possible to substantially increase click-through and overall campaign effectiveness;

- video advertising. It allows brand values to be conveyed through dynamic video content, makes it possible to tell brand stories, to show a product «in action,» and to evoke an emotional response. This is one of the most powerful tools for influencing recognition and building trust;

- native advertising. Organically integrates into content – articles, news feeds, social networks. It looks natural, does not irritate the user, and forms a positive attitude toward the brand;

- advertising on social networks. Flexible formats, accurate targeting, and a large number of visual solutions make it possible to effectively promote products and services on Facebook, Instagram, LinkedIn, TikTok and other social networks [9]. For an advertising campaign to be effective, it must be designed taking into account the specifics of each platform, in order to increase engagement, recognition, and conversions. This is especially effective for products with broad demand, promotions, and seasonal offers;

– contextual display advertising. This is a network of Google partner placements where banners and ads are shown to users based on their interests and behavior. Contextual display advertising suits various stages of the sales funnel and makes it possible to reach a large audience, as well as to bring visitors back through remarketing;

– in-app advertising. Ads are displayed inside mobile applications and games. The format is especially effective for engaging active users and promoting mobile products. Targeting can be configured by devices, interests, and behavior.

A multimedia campaign is a comprehensive marketing strategy that may include video, animation, interactive elements, and audio. Its goal is to increase brand recognition, grow sales, and build loyalty [10]. Creating an effective campaign is based on target-audience analytics, the development of a concept and creative idea, the creation of multimedia content (videos, banners, presentations), media planning, continuous monitoring, reporting, and optimization.

The general stages of creating a multimedia advertising campaign are as follows [10].

Stage 1 – Marketing analysis. Competitors, their communications, positioning, and promotion channels are studied. A product analysis is carried out, and unique advantages and potential points of growth are identified.

Stage 2 – Strategy development. Based on the data obtained, a strategy is formed with the definition of goals, KPIs, channels, budget, and communication format.

Stage 3 – Query analysis and ad creation. Keywords are selected and banners and video clips are created. Content is adapted to specific platforms and formats.

Stage 4 – Campaign launch. Geotargeting, display schedules, bids, and budgets are configured. Irrelevant placements are disabled.

Stage 5 – Management and optimization. The first indicators are analyzed, adjustments are made, and new creative variants are tested

Stage 6 – Reporting and analytics. After the campaign is completed, a detailed report with recommendations for further improvement is prepared.

The introduction of an early-diagnostics methodology is possible at stages 5 to 6 (campaign launch, indicator analysis, adjustments, and optimization of results).

Multimedia offers significant advantages in advertising:

- high engagement (dynamic content easily holds attention);
- emotional impact (video and audio amplify emotions and increase memorability);
- flexibility (content can be adapted to any platform);
- effectiveness (multimedia allows even complex information to be conveyed simply and clearly) [11].

All of this explains the active use of multimedia advertising campaigns by various brands and retail organizations.

Let us analyze examples of successful Ukrainian multimedia advertising campaigns.

Epicenter – «We Build Together» (a video campaign for TV and YouTube). A series of dynamic clips demonstrating construction processes and ready-made solutions for the home. Animation, close-ups of products, and an emotional narrative were used [12].

Nova Liniya – seasonal digital campaigns. Banners, video clips, and native integrations in thematic media are used. The campaigns are aimed at promoting offers, discounts, gardening products, and construction materials [13].

Leroy Merlin Ukraine – digital promotion of DIY solutions. They use interactive banners, video tutorials, and tips for home craftsmen. This motivates the audience not only to buy materials but also to carry out projects on their own [14].

Multimedia campaigns are also extremely effective for stores selling construction and renovation materials, for the following reasons.

Visualization of complex products. Construction materials are often difficult to «sell» through text alone. Video, 3D animation, and demonstrations make it possible to show the product's advantages, the way it is used, and the final result.

Building trust. Before/after formats, demonstrations of renovations, real cases – this is content that prompts the buyer to choose a particular store.

Engaging a professional audience. Builders, installers, and tradesmen respond better to video reviews, training clips, and tool tests.

Seasonality and promotions. Banners and video formats work excellently for quickly communicating promotional offers – insulation in winter, paint in spring, garden goods in summer, and so on.

Remarketing brings customers back. Users who viewed a product can easily be brought back through display banners – especially when the product is expensive and the buyer takes a long time to make a decision.

Multimedia advertising campaigns significantly increase the effectiveness of promoting construction materials stores. Through a combination of video, graphics, animation, and accurate targeting, they:

- increase brand recognition;
- better explain the advantages of products;
- build trust in the store;
- bring well-motivated buyers;
- increase conversion both in online and offline stores.

For the construction industry, multimedia strategies are not merely a trend but a necessity that makes it possible to stand out from competitors and to present products in the way modern buyers require.

However, to minimize risks and respond in a timely manner to ineffective campaign elements, early diagnostics of multimedia campaign effectiveness is necessary.

3 Capabilities of Google Ads for creating multimedia advertising campaigns

3.1 Analysis of the main capabilities of the Google Ads platform.

Google Ads is one of the most powerful platforms for promoting brands through multimedia content. It makes it possible to create visually rich campaigns that reach a wide audience, accurately target the right users, and deliver measurable results.

The Google Display Network includes more than 3 million sites, applications, and video platforms where multimedia ads can be shown. This provides enormous

audience reach, the display of ads in relevant content (renovation, interior design, construction, DIY, etc.), and a variety of formats: static banners, responsive ads, HTML5 animations, video formats, and so on.

Google Ads supports the following numerous content formats:

a) banners:

- 1) static (PNG, JPG);
- 2) animated (GIF, HTML5);
- 3) responsive (adapt to any size and format);

b) video advertising on YouTube:

- 1) In-stream (skippable and non-skippable);
- 2) Discovery video;
- 3) Bumper Ads (short 6-second clips);
- 4) Outstream video for mobile devices;

c) gallery ads (combinations of images, video, and text);

d) advanced interactive formats:

- 1) HTML5 ads;
- 2) animated banners;
- 3) interactive elements for user engagement.

Google Ads makes it possible to configure the target audience for a multimedia campaign as precisely as possible according to the following parameters:

- interest-based targeting (in-market shoppers, people planning a renovation, the purchase of tools, furniture, materials, and so on);
- demographics (age, gender, marital status, income level);
- content targeting (display in articles and videos on construction, renovation, design, gardening);
- remarketing (returning users who have visited the site or viewed specific products);
- Customer Match (uploading customer lists for precise personalized display).

Another significant advantage is automation and machine learning. Google Ads uses algorithms that optimize campaigns in real time. It can use:

- automated bidding strategies (Target CPA, Maximize Conversions, ROAS);
- automatic adaptation of creatives in responsive ads;
- selection of the most effective combinations of text, video, and banners;
- dynamic ads (pulling products from a feed).

This reduces manual work and increases effectiveness.

Google Ads also makes it possible to configure local advertising for stores. The available formats for promoting local points of sale – Local Campaigns automatically cover Maps, Search, and YouTube; settings for distance to the store; display of directions, operating hours, and promotions. All of this is especially useful for construction-materials stores.

Clear analytics and measurable KPIs in Google Ads make it possible to see the exact effect of multimedia advertising and to optimize it. The following tools for

measuring results are provided: banner interactions, video views, CTR, CPA, ROAS, sales attribution, conversions in Google Analytics 4, and others.

All of this makes Google Ads an ideal tool for multimedia campaigns and allows the creation of strong multimedia campaigns that operate at various stages of the funnel – from attracting attention to closing sales [15-17].

3.2 Key indicators for assessing the effectiveness of campaigns in Google Ads.

One of the main advantages of Google Ads campaigns is the large amount of data available for analysis. This is the key to a better understanding of the advertising campaign, the target audience, and customer interests for further optimization of advertising.

Because of the large volume of information, it is important to understand which indicators are best to use for analysis and how they help improve advertising campaigns.

Let us consider 8 key indicators of advertising campaigns in Google Ads [16, 18].

Impressions and clicks.

One of the main indicators of advertising effectiveness is impressions and clicks (Fig. 1). A click on an ad is the beginning of the sales process, and the number of clicks depends directly on how much money you spend. With the help of this metric, certain trends are tracked that may point to opportunities or to problems with the advertising. For example, if the number of clicks is growing, it is time to increase the budget or the bids on keywords. If the number of clicks is decreasing, this may indicate problems with the ad text or with the chosen keywords.

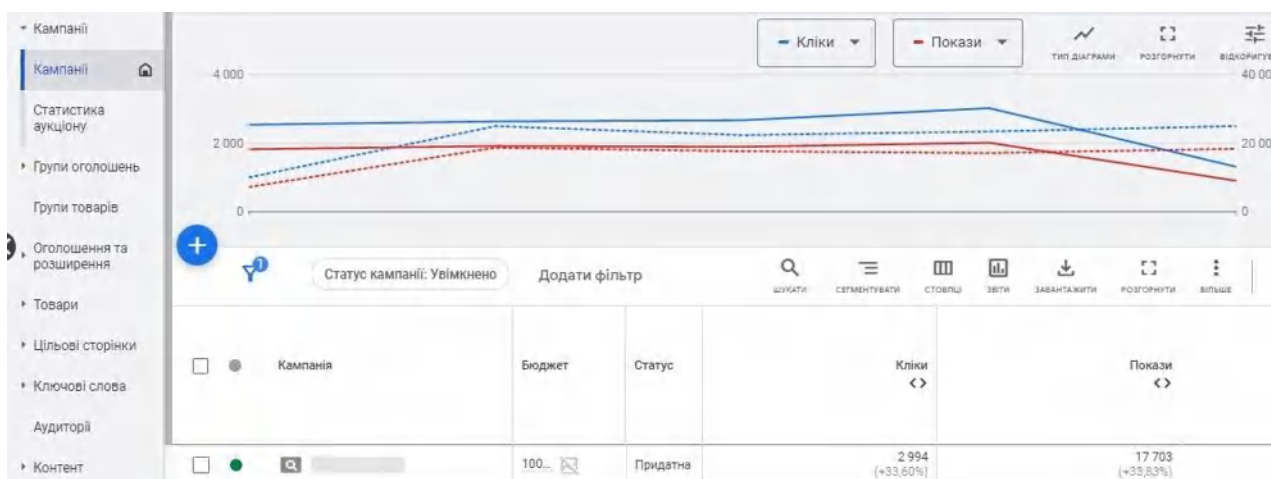


Figure 1 – Statistics of impressions and clicks

Cost per click (CPC). Like clicks, this indicator can convey very valuable information about trends. The cost per click is based on the competitiveness of the chosen keywords, according to the so-called query frequency. Therefore, if CPC rises, the keywords should be reviewed and an attempt should be made to use «longer-tail» words (more than 3 or 4 words long) to attract more targeted traffic. It is also possible to raise the maximum bids on important keywords in order to remain competitive at auctions (Fig. 2).

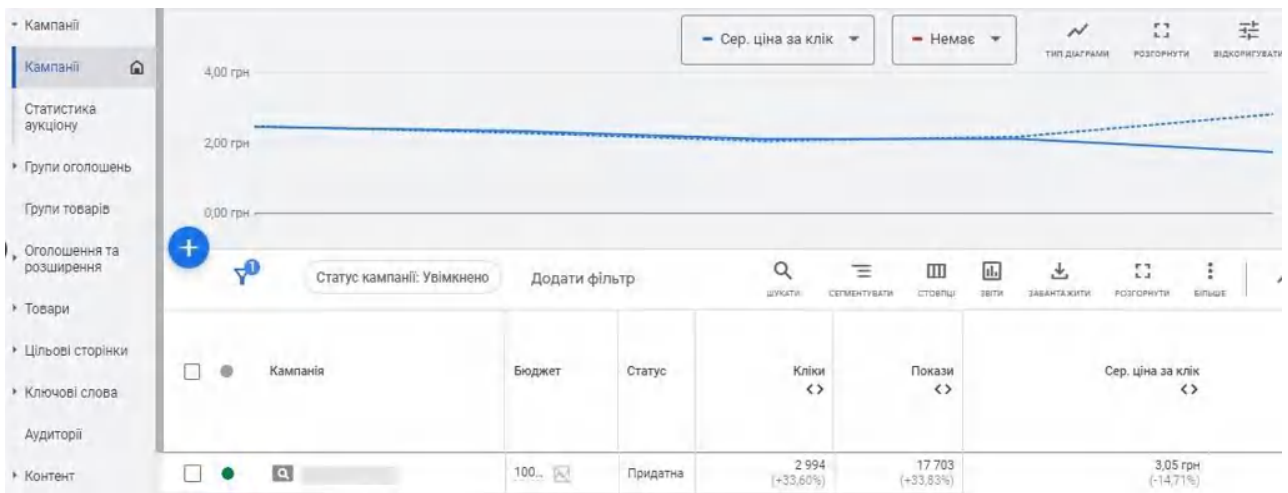


Figure 2 – CPC indicator

Ad click-through rate (CTR). This ratio of clicks to ad impressions helps in understanding one's customers by showing what works and what does not with the target audience. For example, a low CTR means that you are targeting the wrong audience or that you are not «speaking» their language in a way that convinces them to click on the ad. Therefore, the rhetoric should be replaced, the system should be allowed to process new ads, and after some time the indicator should be evaluated again (Fig. 3).

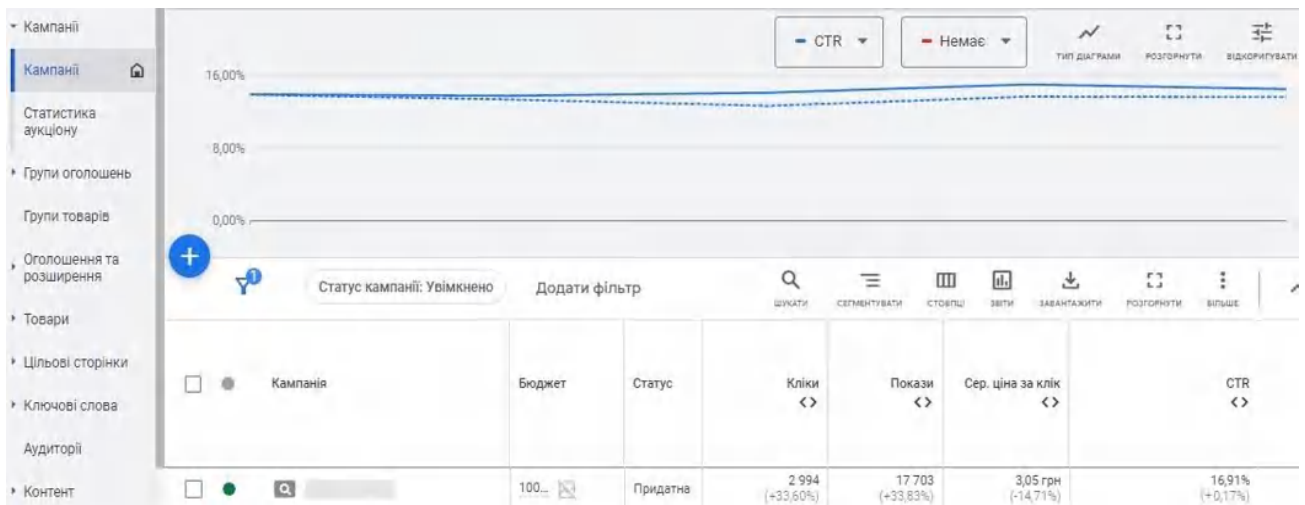


Figure 3 – CTR indicator

Impression share. This is the percentage of all potential ad impressions (Fig. 4). For example, if 1,000 search queries occurred for a keyword and the company's ads were shown 700 times, then the impression share is 70%.

Google also offers two categories of lost impression share: those lost due to limited budget and those lost due to ad rank. This information makes it possible to understand whether to increase the budget, raise bids, or improve quality indicators in the competition for higher ad positions.

Quality Score is an assessment of the relevance of ads, keywords, and landing pages for the user viewing the ad. It is quite important, since Google takes it into account along with the bid for the keyword when determining the position of the ad at

the auction. A higher Quality Score usually helps win against competitors' ads even with a higher bid than yours. In this way, Google ensures that ad positions are not reserved for those who pay the most; instead, everything is determined by creating the best experience for the user.

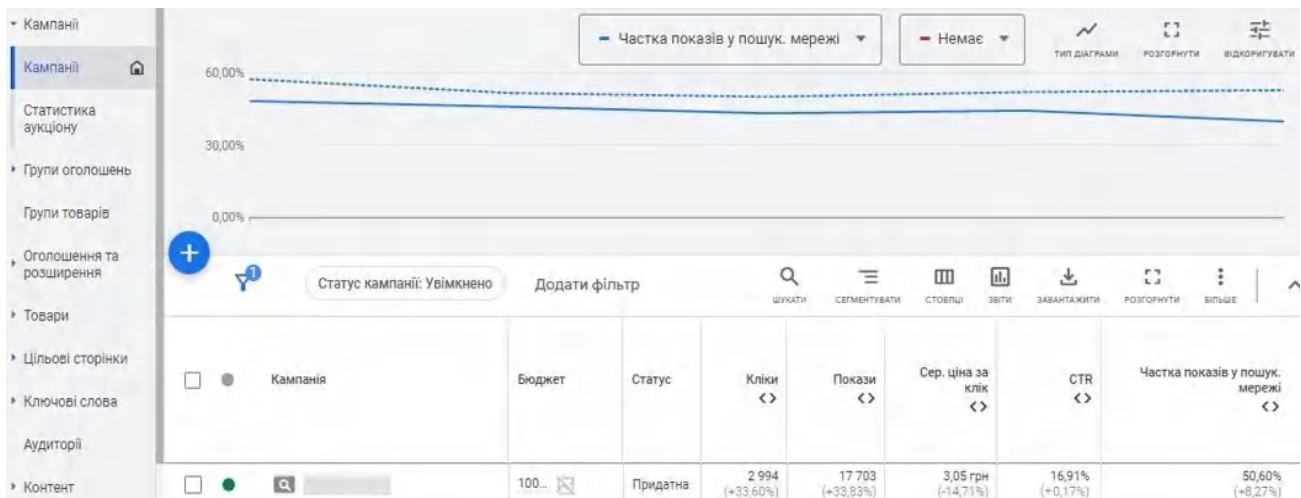


Figure 4 – Impression share

To increase Quality Score it is necessary to create well-structured ad groups; to have landing pages with extensive use of keywords related to everything being advertised; to use keywords in every ad; to show a call to action (CTA); and to make the value proposition very clear (Fig. 5).

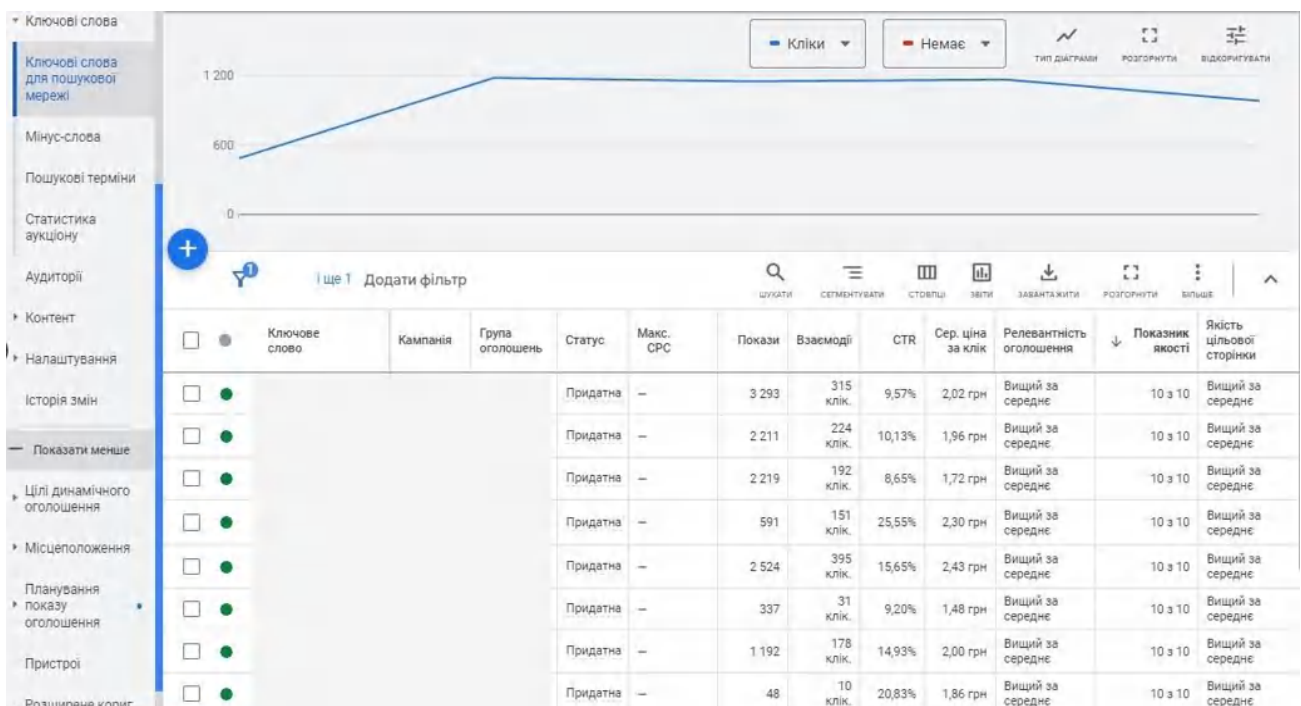


Figure 5 – Quality Score

Conversions.

Keywords and ads are the foundation of ad setup. And the foundation of effective advertising is conversions (Fig. 6). A conversion is a desired target action by the user on the site (for example, a product purchase, downloading documentation, or signing

up for a lesson). As the cost per click grows, sooner or later a situation arises in which it is simply financially impossible to pay for clicks on all keywords. A choice has to be made about which to keep working with and which not. Without conversion tracking it is impossible to know what brings in revenue and what exactly needs to be adjusted.

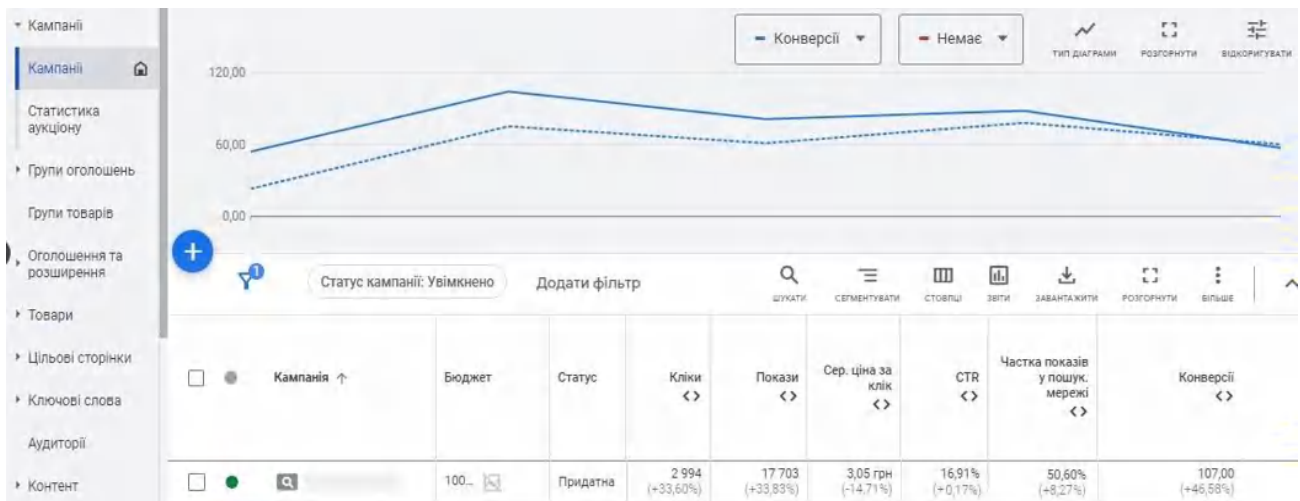


Figure 6 – Conversions

The conversion rate shows the ratio of the average number of conversions to clicks on ads as a percentage (Fig. 7). This indicator makes it possible to learn about the return on investment. The higher it is, the more profitable the campaign will be. If the conversion rate is low, aspects of the website should be analyzed, including design, navigation, relevance, the checkout process, and so on.

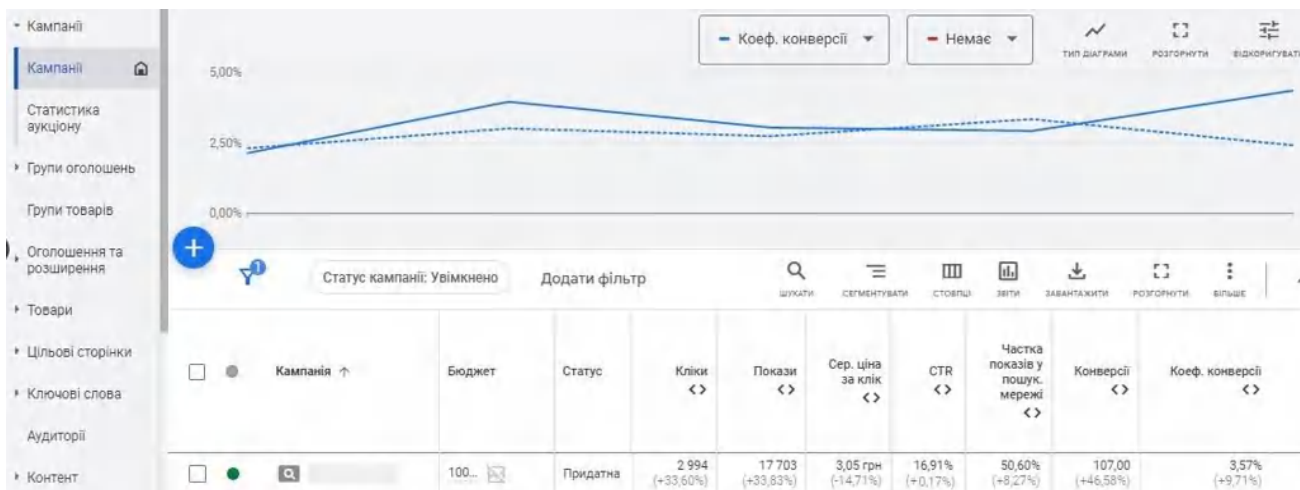


Figure 7 – Conversion rate

When tracking a decline in the conversion rate, it is necessary to:

- check that the tracking code is working;
- make sure that all target URLs are working;
- review search queries to make sure that all ads are shown for relevant queries;
- make sure that the ads and the information on the landing pages are not outdated;
- make sure that keywords and ads are active;
- check that there are no conflicts between negative keywords and keywords;
- make sure that the conversion rate is optimized regularly.

Cost per conversion.

In addition to understanding the number of conversions, another indicator that is worth tracking regularly is the cost per conversion, which is essentially the cost of advertising divided by the number of conversions it has generated. This indicator can quickly show which campaigns are working and which are not – in other words, which of them are spending too much without providing adequate return.

To determine an optimal cost per conversion, it is necessary to decide how much the company is ready to spend on a single sale of a product or service. In addition to the need to take into account the profit margin, it is very important to track the lifetime value of the customer (LTV). For example, is there a likelihood that the customer will have to buy your products again every few months? Is your customer base growing? If so, a high cost per conversion may be justified.

When the cost per conversion is high, it is also worth reviewing the various levels of an ineffective campaign and changing elements accordingly: for example, keywords that did not result in conversions, ad text, calls to action, and landing pages associated with the campaign (Fig. 8).

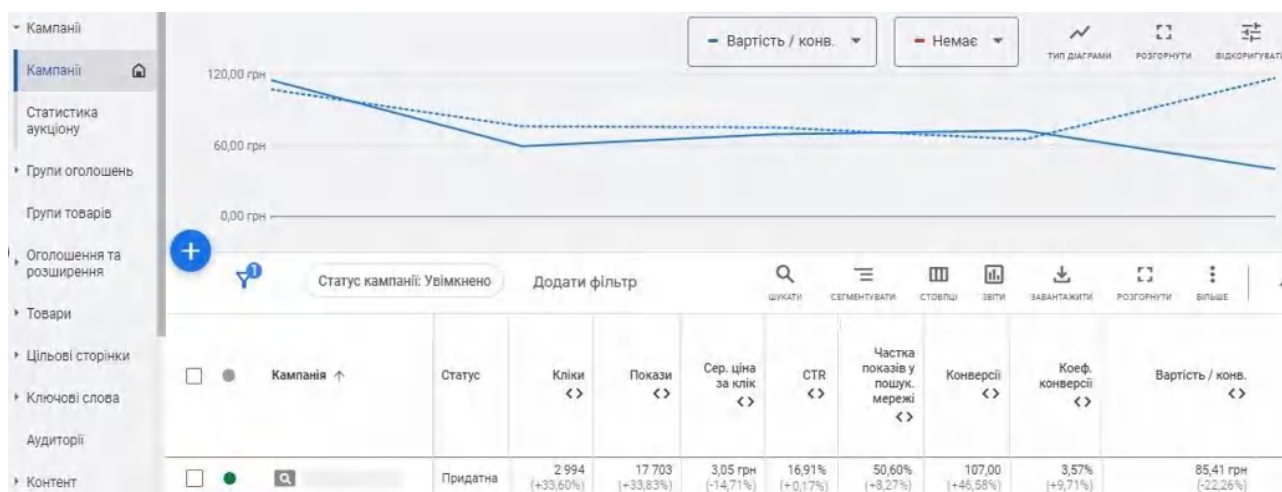


Figure 8 – Cost per conversion

3.3 Automated strategies for launching multimedia campaigns.

Automated Google Ads strategies for launching multimedia advertising campaigns are intelligent Google algorithms that independently manage bids, impressions, and ad optimization in order to achieve the best result in accordance with the chosen goal (for example, obtaining clicks, impressions, conversions, or increasing return on advertising investment) [17, 19].

These strategies are based on machine learning (AI). The system analyzes user behavior, context, conversion history, and thousands of signals (time of day, device, location, audience, etc.) in order to show ads to the most interested users.

Instead of the advertiser manually setting bids, Google itself determines whom and when to show the ad to; automatically adjusts bids in real time; and redistributes the budget between ads, groups, and placements (YouTube, Gmail, partner sites, applications).

The main types of automated Google Ads strategies for multimedia campaigns (banners, video, YouTube, Gmail, Discovery) are presented in Table 1.

Table 1 – Automated Google Ads strategies for multimedia campaigns

No.	Strategy name	Main goal	How the strategy works	Recommended use	Example of practical application
1	Maximize Clicks	Attracting traffic	Google automatically raises or lowers bids in order to obtain the largest number of clicks within the budget.	When it is necessary to quickly gather an audience or to test banners, landing pages, audiences.	A new brand launches an advertising campaign in order to attract traffic to the site and collect the first data.
2	Maximize Conversions	Obtaining more leads / purchases	The algorithm analyzes user behavior and shows ads to those who are more likely to perform the target action.	Campaigns with conversion tracking configured.	An online store shows banners with products in order to obtain purchases or leads.
3	Target CPA	Controlling the cost of a lead	Google sets bids so that the average cost per conversion does not exceed the set value.	When it is necessary to maintain a stable cost per lead (for example, for B2B or services).	An advertising agency configures a campaign to obtain leads at no more than UAH 200.
4	Target ROAS	Maximizing profit	The strategy optimizes bids in order to obtain the highest profit from each purchase, taking into account the income from conversions.	E-commerce where the price of products is known and the value of each conversion can be tracked.	An online store wants its advertising to bring in at least a 400% return on investment.
5	Target Impression Share	Increasing brand awareness	Optimizes bids so that ads are shown as often as possible in the top positions or on the first page.	Campaigns for branding or for launching a new product.	A company launches a video advertisement for a new cosmetics brand and wants to «show up» in front of the target audience.

Table 1 Continued

No.	Strategy name	Main goal	How the strategy works	Recommended use	Example of practical application
6	Smart Display Campaign	Automation of the entire process	Google itself creates and tests combinations of headlines, texts, images, selects the audience, and optimizes bids.	For the quick launch of campaigns without deep manual optimization.	The advertiser uploads banners and texts, and the system itself selects the most effective display options.
7	Maximize Conversion Value	Obtaining the maximum value (revenue)	Similar to Target ROAS, but without a fixed return – it focuses on maximizing the total value of all conversions.	Online stores or services with conversions of varying value.	The advertiser wants not just leads, but leads with the highest potential value.
8	Video Action Campaigns	Driving actions from video (click, lead, purchase)	Uses Smart Bidding to maximize conversions directly from YouTube videos.	For YouTube advertising aimed at sales or lead generation.	A product video is shown to users who are most likely to go to the site and make a purchase.

Advantages of automated strategies:

- reduction of the human factor (no need to change bids manually);
- faster campaign optimization;
- real-time market adaptation;
- better budget distribution;
- the possibility of launching campaigns even without deep knowledge of PPC.

Disadvantages:

- less control over the process (Google itself decides what and where to show);
- the need for a sufficient volume of data (without a history of conversions, the system learns slowly);
- may not be suitable for niche or narrowly specialized businesses.

4 Experimental studies

4.1 Stages of creating a multimedia advertising campaign for a construction-materials store.

In order to develop an effective methodology for early diagnostics of multimedia campaigns in Google Ads, let us consider in detail the stages of creating a multimedia advertising campaign. At the preliminary stage, the main tasks, the goals of each stage,

the performers, the sets of tools, the key results, and the typical KPIs for each stage are formed.

Key development stages.

1. Analysis and strategy:

- analysis of the niche, competitors, and target audience;
- definition of advertising goals (sales, leads, traffic, awareness);
- formation of a unique selling proposition (USP);
- identification of the key advantages of the product or service;
- selection of the type of campaigns (Search, Display, Performance Max, YouTube).

2. Selection and preparation of advertising materials:

- creation of advertising copy (headlines, descriptions, CTA);
- preparation of banners for display advertising;
- preparation of video for YouTube Ads (as needed);
- adaptation of creatives to various formats and sizes;
- alignment of the style of messages with the brand.

3. Setting up campaigns in Google Ads:

- selection of keywords and negative keywords;
- configuration of geotargeting and languages;
- determination of the budget and bidding strategy;
- configuration of audiences (interests, remarketing, similar audiences);
- connecting conversions (via GA4, GTM, or manually).

4. Launch and optimization:

- launch of the advertising campaigns;
- analysis of indicators (CTR, CPC, conversions, CPA, ROAS);
- A/B testing of ads and creatives;
- optimization of keywords, bids, and audiences;
- disabling ineffective ads and scaling successful ones.

5. Analytics and reporting:

- regular analysis of campaign results;
- evaluation of the achievement of the stated goals;
- preparation of reports for the client;
- implementation of strategic changes to increase effectiveness.

The foundation of an effective advertising campaign lies in a detailed analysis of the target audience, in the development of a concept and creative idea, in the creation of multimedia materials (banners and presentations), in well-thought-out media planning, and in continuous monitoring, reporting, and further optimization. The next steps, therefore, are the analysis of the target audience and the development of advertising materials for the construction-materials store.

4.2 Psychographic analysis of the target audience.

To develop effective multimedia advertising content it is necessary to carry out a psychographic analysis of the target audience

Psychographic analysis – that is, an understanding of the audience's pains, fears, and motives – is needed in order to create a creative asset that will truly «hook» the user and elicit the desired reaction [10]. In this process, the multimedia creative (for example, a banner) works as the first filter: it helps Google Ads algorithms more quickly understand which users are the target ones. This accelerates the system's learning phase and improves advertising effectiveness, in particular the iROAS indicator, in accordance with the principles of early campaign diagnostics.

The target audience of the project consists of owners of private houses that are being built or undergoing major renovation.

To carry out the segmentation of the target audience of the construction-materials retailer, an analysis of the web resource's data set was performed with the following parameters:

- analysis period: 01.01.2025 – 31.10.2025 (10 months), which makes it possible to eliminate the influence of short-term seasonal fluctuations;
- data source – export data from Google Analytics 4 (GA4).
- sample size – more than 160,000 users, which ensures high statistical significance of the conclusions.

The purpose of the analysis is to identify priority segments for scaling PMax campaigns.

Analysis of the age structure of users demonstrates a clear shift of the distribution toward a mature, solvent audience, which is typical of a market with a high average order value (High ACV).

The 18-24 segment accounts for only about 5.5%, which indicates the low effectiveness of broad targeting on a younger audience. Decisions to purchase expensive construction materials are more often made by users aged 35 and above, since they typically own real estate or work professionally in the construction sector.

Therefore, a decision was made to exclude the «18-24» age segment from the PMax settings in order to optimize the budget (Table 2).

Table 2 – Distribution of active users by age

Age	Active users	Share (of identified)	Strategic interpretation
35-44 years	46 973	29.34%	Core A: Active homeowners and foremen
45-54 years	35 125	21.94%	Core B: Real-estate investors
55-64 years	28 321	17.69%	Conservative buyers (B2C)
25-34 years	23 327	14.57%	Young families (first home)
18-24 years	7 850	4.90%	Irrelevant traffic (students)
Other	18 477	11.54%	Irrelevant traffic (retirees)
Total	160 073	100.00%	

Analysis of interest categories helps in practice to separate the two main audience groups – B2C and B2B – discussed in the theoretical part. The B2C segment consists of private users interested in renovating or arranging their own homes. The B2B segment consists of professional market participants: builders, installers, designers, and contracting companies (Table 3).

Table 3 – Top 5 audience interest categories per GA4

Interest category (Google Taxonomy)	Active users	Segment type	Diagnostic value
News / Avid News Readers	54 855	General	Low (informational noise)
Vehicles / Auto Enthusiasts	27 513	B2B / B2C	High: Marker of mobility (foremen or suburban residents)
Home & Garden / Decor Enthusiasts	26 441	B2C	Critical: Direct interest in renovation
Banking / Avid Investors	21 777	High Net Worth	High: Marker of high income and an investment-oriented approach
Travel / Travel Buffs	18 956	B2C	Medium (lifestyle)

The high share of users from the «Auto Enthusiasts» and «Investors» categories confirms the hypothesis of the bimodality of the audience. This means that it consists not only of people doing renovations for themselves but also of a noticeable cluster of professionals and investors. Such a structure requires different approaches to communication: for car enthusiasts, more rational messages are appropriate, while for investors, image-driven and value-driven creatives are more effective.

Owing to such analysis, it is possible to see clearly which interests belong to each group and to configure the advertising more accurately.

Next, we will conduct an analysis of user geography (Table 4)

Table 4 – Top 5 cities by user activity

City	Active users	Deviation from leader (Kyiv)	Logistics cluster
1. Kyiv	58 873	–	Center (Capital)
2. Lviv	53 544	-9.0%	West (Hub)
3. Dnipro	12 364	-79.0%	East
4. Odesa	9 609	-83.6%	South
5. Ternopil	6 691	-88.6%	West (Satellite)

Analysis of user geography revealed an important pattern that differs noticeably from the typical distribution for Ukrainian e-commerce. The gap between Kyiv and Lviv turned out to be minimal (less than 10%), whereas the large million-plus cities of the East and South (Dnipro and Odesa) demonstrate activity 4-5 times lower. This

dynamic in effect confirms the hypothesis of a pronounced regional concentration of interest in Western Ukraine.

The high indicators for Ternopil, which exceed those expected for cities of its scale, additionally support the effectiveness of a radius-based targeting strategy. Users from these regions have higher conversion potential, since logistics works faster for them and the brand is more recognizable.

On the basis of the obtained data (ground truth), the theoretical model of the target audience needs to be refined in order to form the final multimedia strategy.

The adjustments are as follows.

1. Demographic filter.

It is advisable to shift the display budget to the 35–64 age group – it is precisely this segment that demonstrates the highest solvency and readiness for large purchases. The youth segments can be confidently excluded, since they do not affect conversion in the construction-materials categories.

2. Geographic prioritization.

For the Western region (Lviv, Ternopil, Ivano-Frankivsk) it is worth creating separate asset groups with their own value propositions – first and foremost regarding logistics, delivery speed, and local brand recognition. This cluster demonstrates the highest potential.

3. Audience signals.

The Auto Enthusiasts and Avid Investors segments have proved to be non-obvious but statistically significant indicators. They can be used as signals for the PMax algorithms, which will help the system more accurately identify users with high conversion value.

A retrospective analysis of historical Google Analytics 4 data (more than 160,000 users) made it possible to confirm the key provisions of the theoretical model and to identify the necessary adjustments.

Based on the results of the target-audience analysis, the following conclusions can be drawn:

- the hypothesis about the effectiveness of broad reach was not confirmed. The main conversions are generated by the 35–64 age group. Disabling the 18–24 segment makes it possible to allocate the budget more effectively and to increase LTV at the level of the entire campaign.

- a geo-logistical cluster was identified. The Western region demonstrates activity comparable to, or higher than, that of Kyiv, while other large cities lag significantly behind. This means that the optimal strategy will be not a nationwide one, but a cluster-based one with an emphasis on the West.

- the high share of users with interests in cars, investments, and construction confirms the two-component structure of the audience: domestic buyers (B2C), specialists and investors (B2B).

This makes it possible to use these segments as effective signals for training the Google Ads neural network, increasing targeting accuracy and the overall iROAS.

4.3 Development of multimedia advertising content.

The decision-making process of construction-materials buyers is characterized by high financial and time risks, which generate five key psychographic pains that must be reflected in multimedia creatives (Table 5).

Table 5 – Key psychographic pains for the target audience

Pain category	Description of fear	Requirements for the creative
1. Economic uncertainty	Fear of inflation: «While I am thinking it over, the price will go up by another 20%.»	Emphasis on urgency and on price lock-in as a strategic advantage.
2. Quality and durability	Fear of poor-quality material: «In 5 years the roof will rust or fade in the sun.»	Focus on warranties, premium brands (RUUKKI), and visualization of reliability.
3. Risk of calculations	Fear of an error in calculations: «I will buy too much (and overpay) or too little (and have to find the extra).»	Offer of expert/engineering calculation as a service that saves budget.
4. Complexity of the process	Complexity of the process: «I have to find materials, then a truck, then craftsmen... It's long and complicated.»	Promotion of a «turnkey solution» to remove the logistical burden.
5. Distrust of online sellers	Fear of fraud: «What if they cheat me? Where do I find them afterwards?»	Use of social proof (Google rating) and demonstration of a real presence (warehouses, addresses).

An effective multimedia strategy requires a direct translation of the identified psychographic pains and fears into specific creative hypotheses. In the course of the research, seven display banners were developed. Their concepts respond to the five key psychographic needs of the target audience (see Table 5). Each concept is aimed at one specific pain/fear, which maximizes creative resonance and, accordingly, CTR (Display) and Free Clicks – the key leading indicators for AI (Table 6).

Table 6 – Developed concepts for display banners

Banner concept	Target pain (fear)	Headline (H1) / main message	Visual emphasis	Diagnostic indicator
1	2	3	4	5
1. Anti-inflation	Economic uncertainty	Worried that the price of metal roof tiles will rise again? / Lock in today's price.	Graphic element: a red «stop sign» or a lock on the price tag.	Free Clicks (assessment of offer attractiveness).

Table 6 Continued

1	2	3	4	5
2. Durability and quality	Poor-quality material	A roof that does not rust and does not fade for 50 years / Premium-class metal roof tiles with an official warranty.	Macro shot of the texture of high-quality metal roof tiles with raindrops.	CTR (Display) (assessment of relevance for the premium segment).
3. Turnkey solution	Complexity of the process	We don't just sell metal roof tiles – we build the roof «turnkey» / Professional calculation, delivery, installation.	Split screen: chaos on the construction site (b/w) vs. an ideal finished roof (color).	Asset rating 'Good' (assessment of composition quality).
4. Accuracy and savings	Error in calculations	Don't overpay for extra meters of roofing! / We will do a free engineering calculation.	An engineer or manager with a tablet displaying a roof drawing.	Expected CTR (assessment of the savings promise).
5. Speed and availability	Complexity of the process (timeframes)	Metal roof tiles in stock at the warehouse! / No need to wait for weeks. Shipment within 24 hours.	Photograph of a full warehouse with pallets of metal roof tiles, a forklift.	Free Clicks (assessment of offer urgency).
6. Social proof / Trust	Distrust of online sellers	They trust us with their roof. / Rating 4.5 on Google based on 179+ reviews.	A collage of real photos of completed customer projects + graphics with Google stars.	Ad Strength 'Excellent' (assessment of persuasiveness).
7. Brand focus (RUUKKI)	Poor-quality material (premium segment)	Finnish metal roof tiles RUUKKI. / The benchmark of roofing quality. Official warranty.	A stylish, «upscale» photograph of a house with a Ruukki roof. The brand logo is clearly visible.	CTR (Display) (assessment of demand for a specific brand).

All banners are designed with PMax adaptability in mind: a clear hierarchy, a strong offer, a contrasting call-to-action button (CTA), and the use of a brand color for emphasis (Fig. 9).

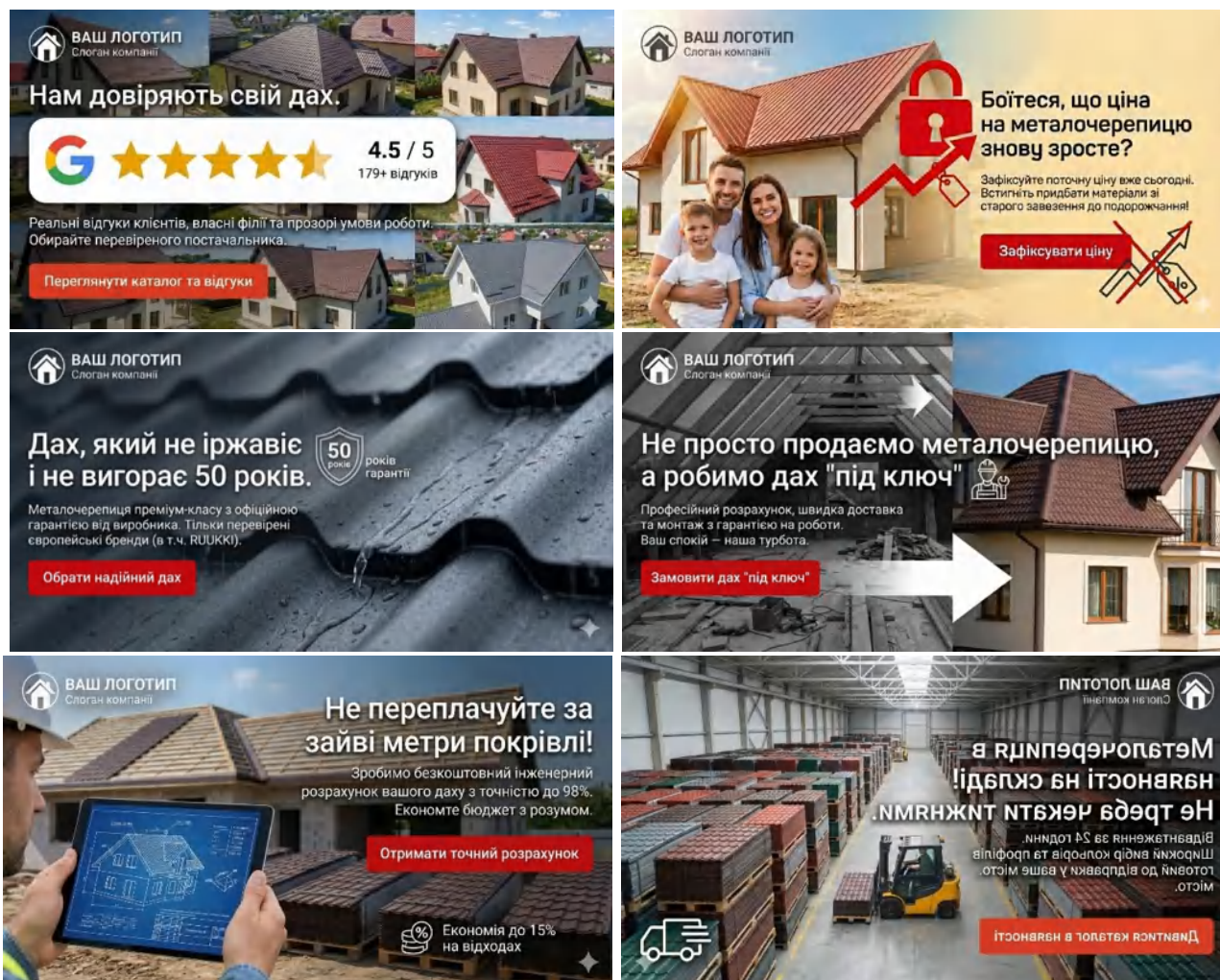


Figure 9 – Examples of advertising banners

A key diagnostic challenge for the developed display materials at the early stages is the «engagement paradox». This is a situation in which a banner has high creative resonance (for example, a high volume of Free Clicks) based on creative-resonance metrics but at the same time demonstrates a low final conversion rate (CR).

There are several reasons for this paradox:

- non-target audience – that is, the advertising material is emotionally appealing but does not contain sufficient qualifying information (for example, prices or specifications), which attracts non-solvent customers;

- relevance gap. The banner's message (for example, the promise of «the lowest price») does not match the landing-page experience (high price, a complex lead magnet), which leads to the loss of the user at the last step – something confirmed by the empirical analysis of the relevance gap.

If during early diagnostics the asset rating shows a «Low» value, this is grounds for the immediate replacement of the creative – that is, for the development and substitution of multimedia advertising materials. In this way, at the early-diagnostics stage, a direct intervention is performed in the work of the AI algorithm, based on the failure of the creative to achieve the target psychographic resonance. And

psychographic analysis acts as a practical diagnostic tool for increasing the effectiveness of the multimedia advertising campaign.

The psychographic analysis carried out for the target audience of the construction-materials store made it possible to transform statistical audience profiles into specific scenarios of adaptive display content. It was determined that creative resonance, measured through Free Clicks and CTR (Display), is a critical leading indicator that accelerates the learning phase of AI algorithms and prevents non-targeted spending. The diagnostics of creatives should be focused on the use of these metrics for the timely detection of the engagement paradox and the activation of a «Go/No-Go» decision rubric for the replacement of assets.

This concept has been implemented in the multimedia banners, but further development of video advertising for YouTube is planned.

4.3 General description of the methodology.

Stage one – preparatory. At this stage, the keyword set (semantic core) is developed. The Google Ads keyword set is the foundation of any advertising campaign in Google – a set of keywords and phrases that most accurately describe your product, service, or advertising topic. An example of keywords for the construction-materials store project is shown in Figure 10.

The quality of the keyword set determines whether your advertising will actually reach the target audience and how effectively the advertising budget will be spent.

The keyword set is a «dictionary» of all user queries that may lead to the display of your advertising. Google Ads uses it in order to understand to whom to show your ads [17, 19].

	A	B	C	D	E
1	* Приклади ключових слів	Порівн. кількість	Рівень конкуренції	Ставка для показу верху сторінки	Ставка для показу згори сторінки
2	метало черепиця	9900.0	Високий	5,17	18,23
3	металопрофіль	9900.0	Високий	4,40	14,35
4	металочерепиц	9900.0	Високий	5,17	18,23
5	металочерепиця	9900.0	Високий	5,17	18,23
6	забор профнастил цена	90.0	Високий	5,24	15,24
7	крыша металочерепица	90.0	Середній	6,81	34,53
8	металопрофіль забор	90.0	Високий	4,78	10,66
9	металочерепиця guikki	90.0	Високий	6,99	25,97
10	прозорий профнастил	90.0	Високий	2,63	7,27
11	профнастил кровельный цена	90.0	Високий	4,46	15,24
12	профнастил на забор ціна	90.0	Високий	3,58	11,31
13	цена металочерепица	90.0	Середній	3,36	22,42
14	купити металопрофіль на забор	720.0	Високий	4,07	11,11
15	купити профнастил для забора	720.0	Високий	3,63	11,45

Figure 10 – Examples of keywords

The keyword set includes:

- high-frequency queries (HF) – popular queries with a large number of impressions. For example: «metal profile,» «transparent profiled sheet,» and so on;
- mid-frequency queries (MF) – more specific. For example, «price metal profile»;
- low-frequency queries (LF) – very precise, «warm» queries. For example, «metal profiled sheet price per meter.»

The keyword set is needed in order to:

- understand how users search for your product.
- optimize the advertising budget (do not pay for irrelevant clicks).
- create effective ad groups.
- analyze competitors and find niches with lower bids.
- improve CTR and conversion through an accurate match between the search query and the ad.

The main stages of creating a keyword set:

- a) gathering queries via Google Keyword Planner, Serpstat, Ahrefs, Ubersuggest, Key Collector;
- b) filtering (non-target queries are removed);
- c) grouping by topic, by user intent, and by product type;
- d) optimization (keywords are distributed across ad groups).

The forecast results based on the keyword set are presented in Figure 11.

Stage two – determining baseline metrics after the launch of the campaign in order to verify its effectiveness.

Evaluating the effectiveness of multimedia advertising campaigns in Google Ads is based on the analysis of key metrics and indicators, such as CTR (Click-Through Rate), CPA (Cost per Action), ROAS (Return on Ad Spend), ROI (Return on Investment), and the conversion rate (CR).

When analyzing advertising campaigns and planning subsequent ones, attention must necessarily be paid to these indicators. The more effectiveness is analyzed, the better the understanding of what works and what does not. In doing so, an intermediate result is obtained – which corrective actions are needed. However, the main drawback is that information is obtained only after the campaign has been launched, and in some situations it is impossible to do without preliminary forecasting.

Stage three – the use of automated Google Ads strategies.

Automated Google Ads strategies for launching multimedia advertising campaigns are smart management algorithms that use artificial intelligence to automatically configure bids, impressions, and the optimization of ads. Their goal is to achieve the maximum result in accordance with the set campaign objective: increasing clicks, impressions, the number of conversions, or improving the return on advertising investment (ROI).

These strategies operate on the basis of machine learning – the system analyzes user behavior, the context of impressions, the history of conversions, and thousands of signals (time of day, type of device, geolocation, audience interests, etc.) in order to show ads precisely to those users who are most likely to perform the target action.

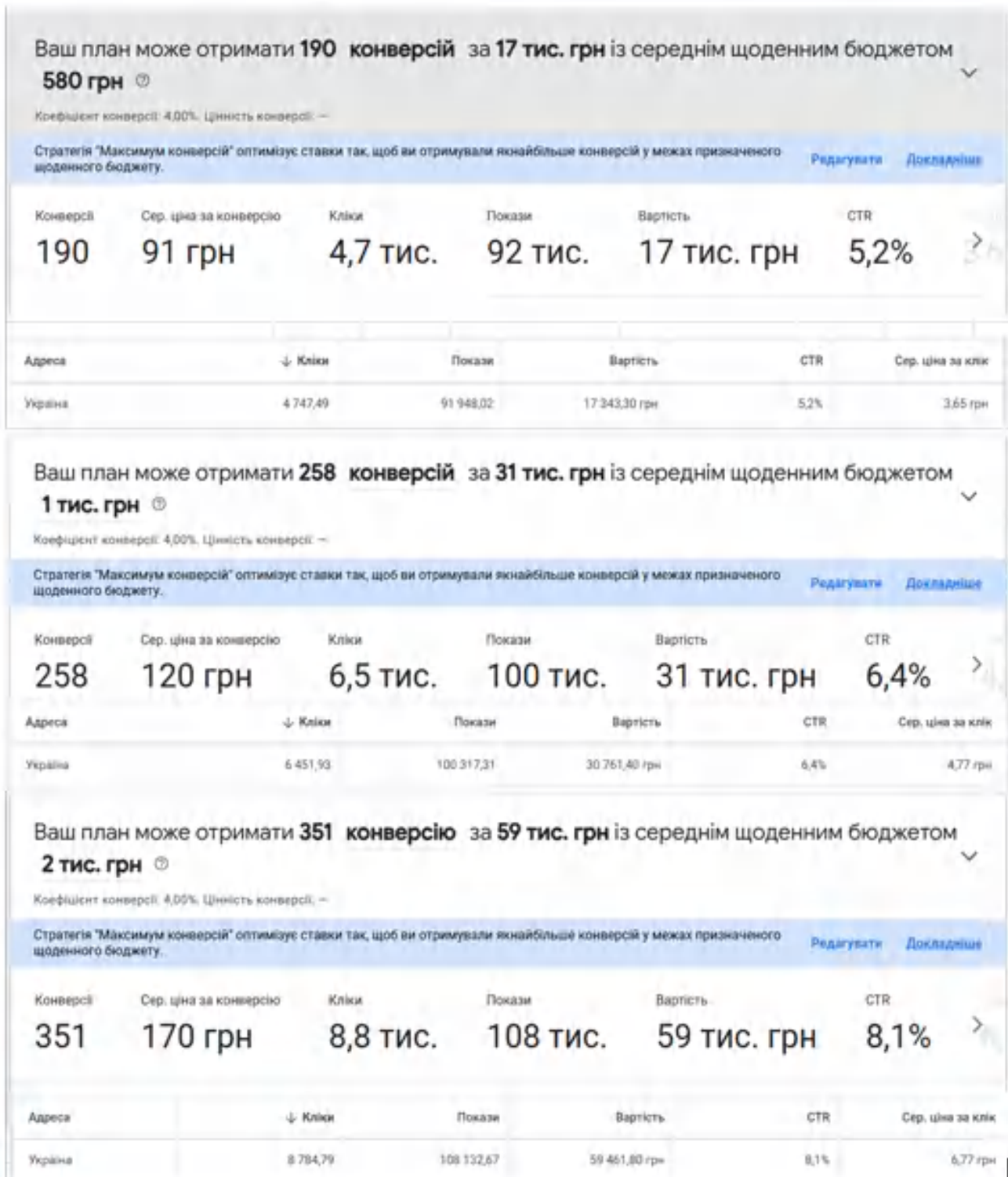


Figure 11 – Keyword planner forecast results

Instead of manually managing bids, Google Ads independently determines the optimal audience and the time for displaying ads; automatically adjusts bids in real time depending on the probability of conversion; and distributes the budget across campaigns, ad groups, and advertising placements (YouTube, Gmail, partner sites, mobile applications) in order to achieve the highest effectiveness.

Types of automated Google Ads strategies for multimedia campaigns:

– Maximize Clicks. Goal – to obtain as many clicks as possible within the set budget; suitable for test campaigns, for increasing traffic, and for expanding the audience;

– Maximize Conversions. Goal – to obtain as many conversions as possible (leads, purchases, calls). The algorithm learns from the conversion history and shows ads to users who are more likely to perform the target action. Suitable for campaigns with conversion tracking configured;

– Target CPA. Goal – to obtain as many conversions as possible at a given average cost. The system automatically changes bids at auctions in order to reach this average price;

– Target ROAS. Goal – to maximize profit, orienting itself toward the ratio of expenses to revenue. Suitable for e-commerce, where the value of each purchase can be tracked;

– Target Impression Share. Goal – to ensure maximum visibility of ads (for example, so that the brand is always «in sight»). Suitable for brand-awareness campaigns or for the launch of new products;

– Smart Bidding strategy (Smart Display Campaigns).

This is a fully automated multimedia campaign in which Google itself selects the audience, creates combinations of headlines, images, and texts, and optimizes bids for conversions. Only the goal (for example, leads on the site), the budget, and the media (banners, video, logos, texts) can be set. Everything else the system does automatically, using artificial intelligence and machine learning [5, 16].

However, the main drawback of these strategies is the need to process a large volume of data, which makes them impossible to use at the early-diagnostics stage.

Stage four – a systematic audit of traffic.

This is a comprehensive review of all channels and sources of site visitors with the aim of determining:

– which sources bring valuable traffic (users who perform target actions);

– which users spend the budget without yielding a return;

– how the quality of traffic changes over time (behavioral factors, engagement indicators, scroll depth);

– how advertising investments affect ROI (Return on Investment).

The purpose of such an audit is to identify weak points in the funnel, adjust the budget, and restore the effectiveness of advertising campaigns without a complete relaunch. That is, when profitability falls, it is necessary to look for the causes and analyze where and why the forecasts do not coincide with the actual results.

A systematic traffic audit is not merely a check of advertising but a strategic tool for managing profitability. It makes it possible to take well-founded decisions about the advertising budget, to increase its profitability, and to create a foundation for early diagnostics of effectiveness, which is especially relevant for Google Ads and multimedia campaigns.

Stage five – offline conversions.

Offline conversions are one of the most important tools of the «advanced level» of working with Google Ads, which allows one to go beyond the standard tracking of clicks and lead forms. This is a user action that took place outside the internet but was initiated through interaction with online advertising [10].

More simply: a person clicked on the advertising, filled out a form, or made a phone call – and made the purchase, signed the contract, registered, or paid already outside the site (in a store, bank, clinic, office, and so on).

Without taking offline events into account, Google Ads sees only part of the picture.

«There was a click → a lead was submitted → what happened next is unknown».

But in fact, some leads may not lead to a sale, and sometimes the opposite happens – the customer does not submit a lead but calls or comes in independently. Offline conversions make it possible to close the chain from a click to a real purchase (Fig. 12).

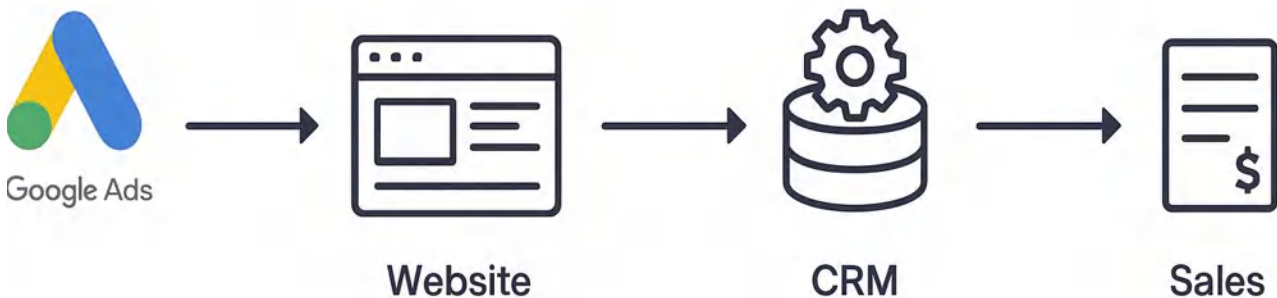


Figure 12 – Diagram of offline conversion

When Google Ads uses only online conversions (form, click, view), the system is optimized based on surface-level indicators. But if offline conversions are connected, then the campaigns learn on the basis of profitability. That is, Google understands which keywords, ads, and audiences bring in customers who actually buy; the Smart Bidding algorithm becomes more accurate, because it operates not on leads but on sales.

Thus, offline conversions are the foundation for building highly effective campaigns and automated strategies of the «Maximize Conversion Value» type. Their application will make it possible, immediately after the launch of an advertising campaign, to activate real orders and sales of construction materials by store customers, reducing time and money spent on developing automated Google Ads strategies.

It is precisely this approach that has been used to develop a methodology for early diagnostics of multimedia campaign effectiveness in Google Ads for a construction-materials store.

Stage six – modeling of the financial funnel. This is a method for analyzing and forecasting the effectiveness of marketing or advertising campaigns through the construction of a model that shows the user's journey from the first contact with the advertising to the financial result (profit or ROI) [6].

In other words, it is a mathematical or analytical reproduction of the movement of money in the sales funnel, which makes it possible to understand at which stage the campaign loses effectiveness and how to increase profitability.

The financial funnel is not merely the number of clicks or leads. It shows how investments in advertising are transformed into profit through all the stages of user interaction with the business. The typical structure of the Google Ads financial funnel is presented in Table 7.

Table 7 – Structure of the Google Ads financial funnel

Stage No.	Stage	Metric	Explanation
1	Advertising costs	Ad Spend	How much has been invested in the campaign
2	Impressions → Clicks	CTR, CPC	How the advertising attracts attention
3	Clicks → Leads	Conversion Rate	How many users performed the target action (lead, call)
4	Leads → Sales	Lead-to-Sale Rate	What share of leads converts into sales
5	Average order value	AOV (Average Order Value)	Average revenue per deal
6	Profit / ROI	Return on Investment	Result of investment effectiveness

The decision-making funnel forms a holistic view of the user's journey from the first touch with the brand to making a purchase. For the construction-materials market (especially for expensive and technically complex products such as roofing systems), this journey is gradual and includes both rational and psychographic factors.

The proposed financial-funnel model for the construction-materials store is adapted to Google Ads multimedia campaigns.

Stage 1 – Awareness.

What is happening. The user realizes that they need to do a renovation or replace the roof, but they do not yet know which materials will suit them.

Typical need triggers:

- the start of construction;
- major renovation;
- an emergency condition of the roof;
- neighbors/acquaintances have completed roofing work;
- seasonal factors (before the rains/winter).

Marketing tools:

- display banners (PMax, Display);

- YouTube Ads for demonstrating brands (for example, Ruukki);
- broad interest-based audiences: *renovation, construction, architecture*.

Psychographic pains worth addressing:

- fear of a high price;
- fear of the complexity of the process;
- distrust of sellers.

Stage 2 – Interest.

What is happening. The user begins to search for information, comparing materials, brands, prices, and installation technologies.

Behavioral signs:

- viewing videos about installation;
- reading blogs on the choice of materials;
- searching for «comparison of metal roof tiles,» «which roof is better,»

«warranty on roofing.»

Marketing tools:

- Performance Max + Audience Signals;
- remarketing to site visitors;
- creatives focused on values (durability, warranties, awards, brands).

Key arguments at this stage:

- reliability;
- certification;
- «official 50-year warranty»;
- photos of real projects.

Stage 3 – Consideration.

What is happening. The user narrows the choice to 2–3 supplier options.

Typical actions:

- viewing specific series of metal roof tiles;
- checking the availability of the product in stock;
- reading reviews;
- clarifying delivery.

Marketing tools:

- Display remarketing;
- creatives «turnkey solution»;
- emphasis on accurate calculations: «We will do a free engineering calculation of the roof.»

Decisive factors:

- delivery speed;
- availability of the material;
- the company's reputation;
- transparent calculations.

Stage 4 – Intent.

What is happening. The user is ready to contact the company but wants to clarify details.

Behavioral signals:

- adding items to the cart;
- calls or clicks on the «Call back» button;
- viewing the «Contacts» section;
- downloading price lists.

Marketing tools:

- PMax with conversion optimization;
- remarketing to warm leads;
- banners with emphasis: «price locked in,» «discount until the end of the month,» «delivery within 24 hours.»

Marketing tasks:

- remove fears and doubts;
- simplify the user's path to a call/lead form as much as possible.

Stage 5 – Conversion.

What is happening. The user makes a purchase or orders a calculation service.

Factors that influence a successful conversion:

- the manager's quick response;
- the competence of the consultation;
- the possibility of getting everything in one place: material + delivery + installation;
- a final price that matches the one quoted.

Marketing tools:

- Performance Max with optimization for conversion value;
- automated strategies Maximize Conversions or Maximize Conversion Value.

Stage 6 – Repeat purchases and recommendations (Loyalty & Advocacy).

What is happening. The customer returns for additional components, or recommends the company to acquaintances.

Supporting activities:

- email marketing;
- Google Ads remarketing (180-day list);
- banners with cross-offers: gutters, insulation, soffits, and so on.

Result:

- increase in LTV (lifetime customer value);
- reduction in the cost of new leads.

At each stage, different types of display creatives and different audience signals are used, which makes it possible for Google Ads to automatically optimize campaigns in accordance with actual user behavior.

Stage seven – the use of mathematical models within the Google Ads system to automate the analysis of effectiveness, forecast results, and adapt to behavioral changes in the audience.

The sixth and seventh stages will be used in accordance with the specifics of the developed multimedia advertising campaigns (their content, target audience, budget, and so on).

Results and recommendations

For small advertising campaigns, or for enterprises that have physical points of sale (stores, salons, schools, clinics), offline conversions can act as the main tool. This tool, specifically, makes it possible to:

- determine what percentage of online leads actually convert into sales;
- understand which keywords, audiences, or advertising formats bring in the greatest profit;
- automatically adjust the budget, focusing on the effective directions.

To do this, it is necessary to collect data about users who interacted with the advertising (Google Click ID, or GCLID). This can be done from the first day of the campaign launch.

In the CRM or in Excel/Google Sheets, the moment of the real event is recorded – «sale», «signing of the contract», «office visit».

This data is then imported back into Google Ads through the Offline Conversions Import function. Google «learns» which clicks lead to real buyers and optimizes campaigns automatically.

For large campaigns, the early-diagnostics procedure is more complex. Taking into account the preceding analysis of the target audience (owners of private houses being built or undergoing major renovation), the nature of the product (metal roof tiles, roofing systems), and the high cost of a wrong decision, the optimal strategy is Performance Max:

Main reasons for the choice:

- the algorithm uses all available Google placements (YouTube, Display, Search, Discover, Maps), which expands points of contact with the audience;
- the system automatically analyzes the most productive creatives and audience signals;
- PMax has a high ability to adapt to a complex purchase process and a long decision-making cycle;
- relevance for products with a large number of informational queries and a need for retargeting;
- the possibility of optimization for specific business goals: obtaining leads or sales.

Practical advantages:

- an increase in the number of high-quality leads at a stable cost;
- an accelerated learning phase thanks to creative signals from the multimedia banners;
- optimization of expenses through directing the budget to the most effective placements;
- reduction of the marketer's manual work through the automatic testing of creative variations.

Basic recommendations for the early stages of a campaign launch can also be formulated.

At the start, the advertising system needs time to collect enough data to accurately forecast user behavior. Therefore, it is advisable to use strategies that quickly accumulate audience signals, do not require a prior history of conversions, and make it possible to test the quality of creatives and hypotheses.

The recommended strategies at the early stages are as follows.

1. Maximize Clicks. Used for the rapid diagnostics of creatives and makes it possible to assess:

- CTR,
- the level of initial interest,
- the relevance of psychographic messages.

2. Maximize Reach. Suitable for broad reach, when it is important to:

- fill audience segments,
- launch the early learning phase of PMax,
- test banners created on the basis of psychographic pains.

After statistics have been accumulated, the campaign is smoothly transitioned to Performance Max or to a target strategy (Target CPA).

Automated Google Ads strategies correspond to the modern principles of digital advertising:

- a data-driven approach (the system bases decisions on real user signals – interests, behavior, site history);

- reduction of the human factor (the risk of errors in bid configuration is reduced);

- adaptability (the algorithm constantly recalculates optimal audiences and formats);

- a full cycle of optimization (from reach to conversion without loss of data between stages);

- synergy with psychographic creatives, which act as key «quality signals» for the early learning phase.

For the construction-materials market, where decisions are made over a long time and users return to search repeatedly, automated strategies ensure stable development of the funnel and optimization of advertising expenses.

Prototype tools for testing the methodology can be presented in the form of an interactive table, dashboard, or script, along with results from the approbation of the developed methodology using real Google Ads advertising campaigns as examples (Fig. 13).

For multimedia campaigns of a construction-materials store, the optimal automated strategy is «Maximize Conversions» or «Maximize Conversion Value». These allow Google's algorithms to find the warmest audience segments, shorten the campaign's learning period, and increase the return on advertising investment.

With sufficient statistics available, it is also advisable to use Target CPA or Target ROAS for further optimization of the budget and the cost of customer acquisition.

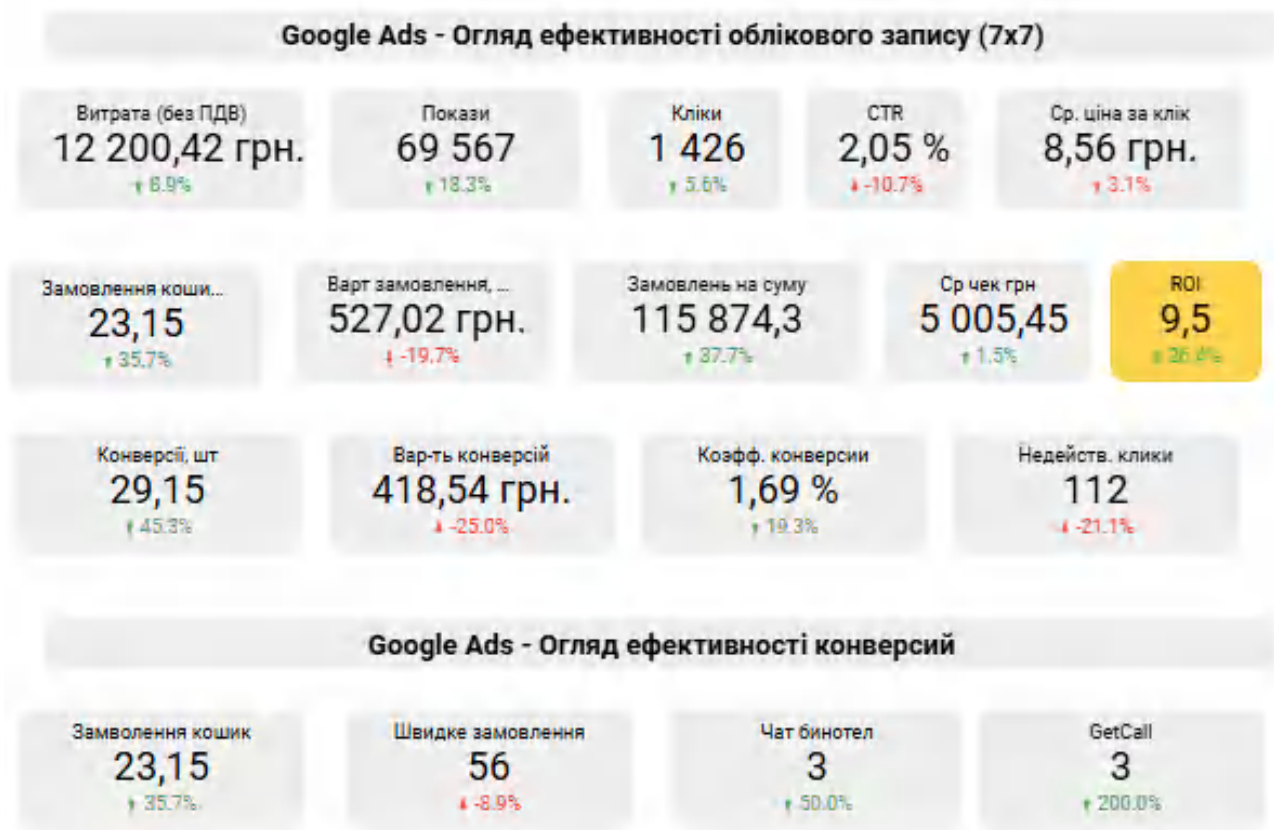


Figure 13 – Testing prototype

At the early stages of launching a multimedia campaign, it is best to use automated strategies oriented toward attracting an audience and collecting data, rather than toward immediate conversions. This helps to pass through the Google Ads algorithm's «learning» phase more quickly and to create high-quality signals for further optimization.

Recommended automated strategies for the early stage.

Maximize Clicks – for gathering the audience. This is the best strategy at the very start; it makes it possible to quickly attract traffic to the site. It forms primary data about the behavior of the audience, which is critical for subsequent strategies, and it is well suited if it is necessary to collect an audience for remarketing and to train the system.

When to apply:

- the campaign has only just been launched;
- there are few historical conversions;
- it is necessary to quickly test creatives and audience signals.

Maximum Coverage (Target Impression Share) – for brand awareness. This strategy makes it possible to show your advertising more often in the right places (for example, at the top of the page). It works well if it is necessary to «establish the brand» among owners of private houses being built or renovated. It can be applied when it is necessary for the brand to appear as often as possible, or when a new product line or a new company is being launched.

Maximum Coverage in Video/Media (Video/Display Reach). Suitable for campaigns with banners and video (YouTube + Display). It allows the system to display ads to the broadest possible number of potential buyers. It can be applied when the building of trust is of great importance and when it is necessary to convey key messages about quality, warranties, the availability of warehouse stock, branded products, and so on.

For a company that sells construction materials (metal roof tiles, profiled metal sheet, «turnkey» services, and so on) and has an audience that takes a long time to make a decision, the following sequence of strategies can be recommended (Table 8).

Table 8 – Sequence of automated strategies for the early stage

Goal	Best strategy
Quickly gather traffic and audience	Maximize Clicks
Make the brand visible	Impression Share / Maximize Reach
Test creatives and audience signals	Maximize Clicks
Launch PMax without history	Maximize Conversion Value (without tROAS

At the early stage, target-CPA (tCPA) or target-ROAS (tROAS) strategies should not be used. They are not suitable for the start because they require statistics on conversions; they work unstably if the data is insufficient; and they may «cut off» impressions to audiences that have not yet learned about the store.

At the early-diagnostics stage, recommendations for the client are also prepared. These set out the main operations for launching the advertising campaign that need to be performed in order to begin work on configuring the account. Some adjustments can also be made during the course of work, but they will directly affect the payback of the advertising.

Conclusions

Under conditions of intense competition, contextual advertising is an integral component of the successful development of a business. This method makes it possible to advertise products or services exclusively to those users who are actively interested in them.

The main advantages of Google Ads advertising for business are that you can accurately direct advertising messages to a specific target audience. It is precisely this that makes it possible to achieve effective conversion, to obtain a quick result, and to control the budget.

On this basis, it becomes clear that work on a methodology for early diagnostics of the effectiveness of Google Ads multimedia campaigns is both scientifically significant and practically useful [20-23].

It can provide:

- prompt detection of declining effectiveness of advertising elements;
- reduction in budget expenditures owing to the avoidance of continuing ineffective campaigns;
- increased control and transparency of advertising processes;
- improvement of the quality of advertising materials, audiences, and landing pages through feedback at the early stages.

The implementation of this methodology has shown the following results: the number of active users following the approbation and implementation of the methodology increased by almost 30,000 people; click-through and the visibility of banner advertising rose by nearly 1.5 times; and conversion grew to 2.2%. This ensures stable development of the decision-making funnel, increases the accuracy of target-audience reach, and optimizes the use of the client's advertising budget.

References.

1. Chen, J., & Stallaert, J. (2019). Modeling Online Advertising: A Review and Research Agenda. *Information Systems Frontiers*, 21(5), 1029-1056. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09919-y>
2. Mishra, A., Jain, R., & Agrawal, P. (2021). TSI: An Ad Text Strength Indicator using Text-to-CTR and Semantic-Ad-Similarity. arXiv preprint arXiv:2108.08226. <https://arxiv.org/abs/2108.08226>.
3. Effendi, N. M., & Ali, N. M. (2017). Click Through Rate Prediction for Contextual Advertising Using Linear Regression. arXiv preprint arXiv:1701.08744. <https://arxiv.org/abs/1701.08744>.
4. Wang, X., Jin, Q., Huang, S., Zhang, M., Liu, X., Zhao, Z., Chen, Y., Zhang, Z., Yang, J., Wen, E., Chordia, S., Chen, W., & Huang, Q. (2023). Towards the better ranking consistency: A multi-task learning framework for early stage ads ranking (arXiv:2307.11096). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2307.11096>.
5. Яцюк, Д.В. (2018). Реклама в інтернеті (Навч. посібник). КНТЕУ. ISBN 978-966-629-907-2.
6. Котлер, Ф., & Армстронг, Г. (2022). Основы маркетингу. Київ: Науковий світ. ISBN, 978-617-7812-04-2.
7. Didenko, O. (2023). Content aspects of advertising images of modern media advertising in Ukraine. *Demiurge: Ideas, Technologies, Perspectives of Design*, 6(1). <https://doi.org/10.31866/2617-7951.6.1.2023.279067>
8. Мальчик, М.В., & Адасюк, І.П. (2021). Реклама в інтернеті: теоретичний аналіз та особливості. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія: Проблеми економіки та управління, 5(1), 75-85. <https://doi.org/10.23939/semi2021.01.075>.
9. Вовк, О.В., Чеботарьова, І.Б., & Шарун, Д.А. (2024). Просування бренду дизайнера через LINKEDIN. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Інновації та розвиток: монографія. (с. 59-81). Харків: ТОВ «Друкарня Мадрид».
10. Kotler, P., Kartajaya, H., & Setiawan, I. (2021). *Marketing 5.0: Technology for humanity*. John Wiley & Sons. ISBN 9781119668510.
11. Kushnir, T., & Moroz, M. (2025). Тенденції розвитку цифрових комунікацій в Україні. *Acta Academiae Beregsasiensis. Economics*, 9, 77-85. <https://doi.org/10.58423/2786-6742/2025-9-77-85>.
12. Епіцентр. (n. d.). <https://epicentrk.ua/>.
13. Нова Лінія. (n. d.). <https://www.nl.ua>.

14. Леруа Мерлен Україна. (n. d.). <https://www.leroymerlin.ua/>.
15. Google Ads Help. (n. d.). Оцінка ефективності кампаній у Google Ads. <https://support.google.com/google-ads/answer/2684769>.
16. Ключові показники для оцінки ефективності кампаній в Google Ads. URL:<https://imrev.agency/blog/key-performance-indicators-for-google-ads-campaigns>.
17. Google Analytics 4 Documentation. (n. d.). Key metrics and dimensions for campaign analysis. <https://support.google.com/analytics/answer/12195621>.
18. Чеботарьова, І.Б., & Баришева, В.С. (2021). Дослідження засобів підвищення ефективності реклами. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 1. (с. 141-143).
19. Chaffey, D., & Ellis-Chadwick, F. (2025). Digital marketing: Strategy, implementation and practice (9th.). Pearson Education. ISBN 978-1-292-73808-6.
20. Vovk, O., & Chebotarova, I. (2025). Effectiveness of a social media advertising of a football club. Innovations in publishing, printing and multimedia technologies 2025. (p. 49).
21. Кондратьєв, О.В., & Вовк, О.В. (2024). Використання SEO для поліпшення видимості бренду в пошукових системах. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 1. (с. 75-76).
22. Манаков, В.П., Чеботарьова, І.Б., & Артаков, М.А. (2025). Особливості ранньої діагностики ефективності мультимедійних кампаній у Google Ads. Сучасні стратегії економічного розвитку: наука, інновації та бізнесосвіта. (с. 60-63).
23. Чеботарьова, І.Б., & Попова, Є.О. (2024). Інтернет-маркетинг у видавничому бізнесі. Поліграфічні, мультимедійні та web-технології. Т. 2. (с. 215-217).

COGNITIVE ASPECTS AND THE EDUCATIONAL POTENTIAL OF INFOGRAPHICS IN THE CONTEXT OF INCREASING INFORMATION FLOWS

Selmenska Z.

Associate Professor, Department of Multimedia Technologies, Institute of Printing
and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-9514-7923

Dubnevych M.

Associate Professor, Department of Multimedia Technologies, Institute of Printing
and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0001-7089-0190

Mykytyuk O.

Professor, Department of Media Communications, Information, and Book Studies,
Institute of Printing and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-7237-4007

***Abstract.** This study examines the cognitive aspects of information perception through infographics and substantiates its educational potential in the context of information overload. Theories of dual coding, cognitive load, and visual thinking are analyzed as the basis for the effectiveness of infographics. The principles of creating infographics, taking into account the characteristics of cognitive perception, have been identified. The didactic possibilities of infographics and its impact on the development of analytical thinking and visual-communicative competence have been examined. It has been proven that the use of infographics increases the effectiveness of learning information and optimizes the educational process.*

***Keywords:** infographics, cognitive processes, information visualization, educational technologies, cognitive load, visual thinking, digital learning.*

Introduction

The current stage of development of the information society is characterized by the phenomenon of information overload, which poses entirely new challenges for pedagogy, psychology, and related fields of knowledge. The exponential growth of information volumes, its high dynamism, fragmentation, and multimedia nature are leading to changes in cognitive data processing strategies, a transformation of learning methods, and a rethinking of the role of educational tools in the knowledge formation process.

Under these conditions, traditional text-centered learning models, which are based primarily on a linear presentation of information, are increasingly demonstrating limited effectiveness. This is due both to the physiological limitations of the human cognitive system (in particular, the limited capacity of working memory) and to sociocultural changes manifested in the phenomena of «clip-based thinking», a

shortened attention span, and an increased need for rapid access to structured information [1, 2].

Information overload in today's educational environment manifests itself in an excessive amount of educational content, the complexity of structuring it, and the need to quickly assimilate large amounts of data. Under these conditions, the challenge arises not only in the transfer of knowledge but also in its optimal organization, visualization, and cognitively effective presentation. This necessitates the implementation of tools capable of reducing cognitive load and improving the quality of information perception.

One such tool is infographics, which combines textual, graphical, and symbolic elements for a compact, visual, and structured presentation of information. Infographics serve not only as a means of visualization but also as a powerful cognitive tool that promotes active thinking, improves understanding of complex concepts, and fosters a systematic view of information.

Scientific research in the field of cognitive psychology confirms the effectiveness of combining verbal and visual channels of information processing. In particular, according to A. Paivio's dual-coding theory [3], information presented simultaneously in both textual and graphical forms is processed more effectively than when only a single channel is used. J. Sweller's cognitive load theory [2] also emphasizes the importance of optimal information structuring to prevent working memory overload.

In the context of educational technology, infographics serve a number of important functions:

- organizing complex data;
- enhancing understanding of educational material;
- developing analytical and critical thinking skills;
- stimulating learners' cognitive engagement;
- developing visual literacy.

The use of infographics is particularly relevant in the context of the digitalization of education and the transition to blended and distance learning. In the digital environment, infographics serve as a universal means of communication that ensures effective information transfer regardless of platform format or device type. Additionally, interactive infographics expand opportunities for user engagement, promote personalized learning, and enhance material retention.

Another important aspect is the development of visual-communicative competence [4, 5], which involves the ability not only to perceive but also to create infographics as a tool for presenting knowledge. This is particularly important for training professionals in fields related to media, design, publishing, education, and information technology.

Thus, in the modern educational environment, infographics are viewed not merely as an auxiliary tool but as a full-fledged instrument for the cognitive optimization of the learning process. Their use enhances learning effectiveness, ensures

a deeper understanding of the material, and contributes to the development of modern competencies necessary for functioning in the information society.

Thus, the relevance of researching the cognitive aspects and educational potential of infographics stems from the need to find effective ways to organize and present information in an environment of information overload. Further study of this issue opens up opportunities for improving teaching methods, integrating innovative technologies, and enhancing the quality of the educational process as a whole.

Purpose and Objectives of the Study

In today's Ukrainian educational landscape, infographics are gradually evolving from a supplementary visual element into a full-fledged pedagogical tool. This is linked to the digitization of education, the development of distance and blended learning, as well as the need to adapt educational content to the ways in which today's students process information.

The reform of Ukraine's educational system, particularly the implementation of the New Ukrainian School concept, has brought to the forefront the development of visual literacy, critical thinking, and information literacy. One of the key areas of modernizing the educational process has been the introduction of multimedia and interactive forms of presenting information, among which infographics play a significant role.

Infographics in Ukrainian education are used in several main areas [6,7]:

- as a means of visualizing educational material;
- as a tool for developing analytical thinking;
- as a way to structure large amounts of information;
- as an element of digital educational resources;
- as a method for encouraging independent student work.

Infographics are particularly widely used in:

- distance learning;
- STEM education;
- media education;
- preparing presentations;
- online courses;
- educational platforms and massive open online courses (MOOCs).

The digitization of the educational environment has significantly amplified the role of visual communication. After a significant number of educational institutions transitioned to distance and blended learning, there arose a need to adapt educational content for on-screen viewing. In this context, traditional large blocks of text often prove less effective than structured visual models[7].

Modern digital educational platforms in Ukraine actively use infographics as a component of multimedia educational content. For example, the educational projects Prometheus [8] and EdEra [9] widely employ:

- diagrams;

- visual algorithms;
- charts;
- information blocks;
- interactive visualizations.

This helps to: reduce cognitive load, facilitate quicker orientation within the material, increase learner engagement, and improve information retention.

Ukrainian researchers also emphasize that infographics are an effective means of integrating textual, graphical, and statistical information into a single cognitive structure, which is particularly important in the context of information overload.

In Ukrainian higher education institutions, infographics are increasingly being used as a means of presenting educational material, a form of independent student work, an element of scientific communication, and a tool for developing digital competencies.

In the learning process, infographics provide opportunities to visualize complex concepts and demonstrate cause-and-effect relationships, model processes, and organize large amounts of information, while also helping to improve analytical thinking skills [10].

Importantly, the creation of infographics by students, in particular, contributes to the development of visual thinking skills and the ability to analyze and synthesize information. It fosters an understanding of information culture and promotes the development of design competencies and digital literacy.

In the context of the competency-based approach, infographics serve not only as a form of information presentation but also as a means of developing comprehensive professional competencies.

In Ukrainian scientific and pedagogical discourse, infographics are increasingly viewed as an important component of media education. This is linked to the growing role of visual communication in the digital information environment. Since infographics allow for the critical analysis of informational messages and the interpretation of statistical data, as well as the recognition of manipulative visual practices, they contribute to the development of media literacy skills.

In today's climate of information warfare and disinformation, visual literacy has taken on strategic importance. The ability to correctly interpret graphical information has become a vital component of information security and civic competence.

Despite its significant potential, the integration of infographics into domestic educational practice is accompanied by a number of challenges. There is an insufficient level of digital training among educators – some of them lack the necessary skills to create high-quality infographics and use specialized digital tools; there is a lack of methodological standards, manifested in the insufficient development of criteria for evaluating infographics, methods for their creation, and didactic principles for their use. Among the challenges of creating and implementing infographics in the educational environment is the risk of visual overload, which stems from an excessive number of graphic elements. This, in turn, can hinder information comprehension and

reduce the effectiveness of learning. Another issue is the superficial use of infographics as a decorative element without any real cognitive function.

The future development of infographics in Ukrainian education is linked to:

- the integration of artificial intelligence technologies;
- the development of interactive infographics;
- the implementation of adaptive learning;
- the use of VR/AR technologies;
- the automation of educational content creation.

Another promising area is the application of: analytical infographics, dynamic visualizations, multimedia educational models, and interactive cognitive maps.

In the context of the digital transformation of education, infographics have the potential to become one of the fundamental tools for organizing educational communication.

Given the rapid growth of information volumes, its fragmentation, and the high speed of its dissemination, the issue of effective knowledge acquisition in the educational environment has become particularly relevant. Information overload, limited human cognitive resources, and the transformation of ways of perceiving information (in particular, the development of visual and clip-based thinking) necessitate the search for innovative approaches to organizing educational content.

In this context, infographics are viewed as a promising tool that combines visual and verbal components, ensuring the effective communication of complex information. However, despite the widespread use of infographics in educational practice, their cognitive mechanisms and didactic potential require systematic theoretical analysis and scientific justification.

The aim of this study is to provide a theoretical foundation for the cognitive aspects of infographics and to identify its educational potential in the context of intensifying information flows, as well as to develop scientifically grounded approaches to the effective use of infographics in the modern educational process.

Achieving this goal involves integrating principles of cognitive psychology, visual communication theory, pedagogy, and digital educational technologies to form a comprehensive understanding of infographics as a tool for optimizing educational activities.

To achieve this goal, it is necessary to solve a set of interrelated scientific tasks:

Theoretical and conceptual tasks involve analyzing contemporary scientific approaches to understanding the phenomenon of infographics in the context of visual communication; refining the conceptual and categorical framework of the study (infographics, data visualization, cognitive processes, cognitive load, etc.); determining the place of infographics within the system of modern information and communication technologies.

The cognitive-psychological objectives consist of studying the mechanisms of perception and processing of visual information; analyzing the impact of infographics on working memory, attention, and memorization processes; substantiating the effectiveness of infographics based on dual-coding theory and cognitive load theory;

identifying the cognitive factors that influence the effectiveness of visualizing educational material.

The didactic objectives are to identify the educational functions of infographics in the learning process; to explore the potential of infographics in developing key competencies among learners; to establish didactic principles for the creation and use of infographics; and to develop criteria for evaluating the effectiveness of infographics as a pedagogical tool.

The analytical and applied tasks are based on analyzing current practices in the use of infographics in the educational environment, particularly in Ukraine; identifying common errors and limitations in the use of infographics; classifying types of infographics according to their functional and pedagogical purposes; and exploring the possibility of integrating infographics into digital educational platforms.

The methodological tasks consist of developing recommendations for creating effective infographics that take into account the cognitive characteristics of information perception; defining algorithms for using infographics in various forms of instruction (classroom, distance, and blended); proposing a model for integrating infographics into educational courses, and justifying a methodology for developing visual-communicative competence.

Prospective and predictive tasks define the directions of infographics development in the context of the digitalization of education and make it possible to assess the potential for integrating infographics with artificial intelligence technologies. An important task is to outline the prospects for using infographics in multimedia educational environments.

Research object: the process of visualizing educational information in the context of the modern information society.

Research subject: the cognitive mechanisms underlying the functioning of infographics and its didactic potential in the educational process.

To achieve the research objectives and tasks, a set of methods was applied:

- theoretical: analysis, synthesis, generalization, and systematization of scientific sources;

- comparative analysis: comparison of different approaches to information visualization;

- structural-functional method: to determine the role of infographics in the educational process;

- modeling: to develop conceptual models for the use of infographics;

- empirical (as needed): observation, surveys, analysis of learning outcomes.

The scientific novelty of the study lies in the systematic justification of infographics as a cognitively oriented educational tool and the integration of cognitive-psychological and pedagogical approaches to its analysis; the refinement of didactic principles for creating infographics; and the development of models for the effective use of infographics in the educational process.

The practical significance lies in the possibility of using the research findings to develop educational courses that incorporate infographics, thereby enhancing the

effectiveness of the educational process and improving teaching methods. The results can be utilized in the creation of digital educational resources for training professionals in the fields of media, education, design, and information technology.

Thus, the formulated research objectives and tasks reflect the comprehensive nature of the issue, combining cognitive, pedagogical, and technological aspects of infographic use. Their implementation allows not only for a deeper understanding of the mechanisms underlying the effectiveness of information visualization but also for the development of practical recommendations to improve the modern educational process in the context of information overload.

Presentation of the main research findings

The intensification of information flows in modern society has led to a situation where the volume of information exceeds human cognitive capacity for processing it. The limitations of working memory, the selective nature of attention, and the need for rapid decision-making necessitate the use of effective methods for presenting knowledge. In this context, visual forms of information presentation, particularly infographics, take on special significance. From the perspective of cognitive psychology, the effectiveness of infographics is explained by the integration of two channels of information processing – verbal and visual. According to the dual-coding theory [3], the simultaneous use of textual and graphic elements facilitates the formation of more stable cognitive connections. This ensures better interpretation and long-term retention of information.

In addition, cognitive load theory [2] emphasizes that the optimal organization of educational material should minimize excessive load on working memory. Infographics, thanks to their structure and compactness, allow for a reduction in the amount of information to be processed simultaneously and facilitate more effective knowledge acquisition.

Thus, infographics serve as a cognitive tool that:

- optimizes the process of information perception;
- reduces cognitive overload;
- stimulates visual thinking;
- facilitates the formation of systematic understanding.

Let us consider the theoretical and methodological foundations of studying infographics as a cognitive tool. The contemporary paradigm of infographics research is shaped at the intersection of cognitive psychology, learning theory, visual communication, and information design. Within this approach, infographics are viewed not merely as a form of information representation, but as a cognitively mediated tool for knowledge construction that influences the structure of the learner's mental models.

The key methodological foundation of the study is the integration of the following theoretical frameworks:

- dual coding theory [3];

- cognitive theory of multimedia learning [1];
- cognitive load theory [2];
- theory of visual perception and information visualization [4];
- the concept of mental models [10] (Johnson-Laird, 1983).

Let us consider the theories used for structured theoretical analysis.

The dual-coding theory [3], formulated by Alan Paivio in 1971, is one of the fundamental cognitive theories that explains the mechanisms of information processing by the human brain through the interaction of two specific systems.

The fundamental premise of the DCT is that human cognition is driven by two functionally independent yet interconnected information-processing systems. The verbal system specializes in processing linguistic units such as text and speech, while the nonverbal (imaginative) system is responsible for processing visual images, spatial characteristics, and other nonverbal objects. Paivio argues that memory and thinking are more effective when information is encoded simultaneously in both systems, as this creates two independent pathways for subsequent data retrieval.

To describe the representational units within each system, Paivio introduced special terms: logogens and imagens. Logogens are the operational units of the verbal system. They are organized hierarchically according to a linear principle, like words in a sentence. Logogens are processed sequentially (successively). Imagens are the units of the nonverbal system. They store information about holistic images and spatial relationships. Unlike logogens, images are processed in parallel (simultaneously), which allows for the instantaneous perception of complex visual scenes.

The theory identifies three levels of interaction between stimuli and cognitive systems.

1. Representational processing – the direct activation of logogens by linguistic stimuli or of imagens by sensory images (for example, you see an apple, and the image of an apple is activated).

2. Referential processing – intersystem activation. This is the ability of the verbal system to trigger activity in the nonverbal system and vice versa (for example, when you hear the word «sea», you imagine waves).

3. Associative processing – intra-system activation. The connection between units within a single system (for example, the word «school» evokes the association «teacher», and the image of a «table» is associated with the image of a «chair»).

One of the theory's key conclusions is an explanation of why concrete nouns (e.g., «*bicycle*») are remembered better than abstract concepts (e.g., «*justice*»). This is called the Concreteness Effect: concrete words are easily subject to dual encoding and activate both the logogen and the image. In contrast, abstract words are usually encoded only verbally, which makes the cognitive trace less durable.

In the current context, the use of multimodal stimuli is essentially a technical implementation of dual coding, in which textual and visual tokens interact through the cross-attention mechanism. Thus, A. Paivio's dual-coding theory remains fundamental to understanding how multimodal stimuli (text + images) create more integrated and

stable cognitive structures, which is critically important for the development of intelligent decision-support systems.

Within these approaches, infographics are interpreted as a means of externalizing knowledge, facilitating the transition from linear textual representation to a multidimensional cognitive structure.

Cognitive load theory [2], developed by John Sweller in the late 1980s, is one of the most influential concepts in contemporary educational psychology and knowledge engineering. It is based on an understanding of the architecture of human memory and its limitations in the process of acquiring new information.

J. Sweller's cognitive load theory is based on the existence of working memory and long-term memory. CLT is based on a model of information processing that accounts for the critical difference between the two types of memory; specifically, working memory has an extremely limited capacity (according to Miller, about 7 ± 2 units of information) and storage duration. It is here that active processing of new data takes place. Long-term memory has virtually unlimited capacity and stores knowledge in the form of complex cognitive structures – schemas. A schema is a cognitive unit that integrates a set of information elements into a single whole. The learning process consists of creating new schemas or automating existing ones, which frees up working memory resources.

Swellers identifies three specific types of cognitive load that collectively determine the total demand on working memory.

1. Intrinsic Cognitive Load is determined by the complexity of the instructional material itself and the learner's level of preparation. It depends on the number of elements that must be processed simultaneously (the interactivity of the elements). This load is an integral part of the task and cannot be altered without simplifying the learning content itself.

2. Extraneous Cognitive Load is caused by the way information is presented or by instructional actions that do not directly contribute to knowledge acquisition (e.g., poor interface design, excessive text on slides). This load is destructive because it consumes the working memory resources necessary for learning.

3. Relevant (constructive) cognitive load: efforts aimed at directly creating and automating cognitive schemas. This is a «useful» load that promotes deep understanding and the transfer of knowledge.

Research conducted within the CLT framework has identified a number of effects that help reduce extraneous cognitive load. The first is the split-attention effect, which occurs when a student is forced to mentally integrate two sources of information separated in space or time (for example, text on one page and a diagram on another). The second is the modality effect, where working memory has separate channels for visual and auditory information. Presenting part of the material verbally and part visually expands the overall capacity of working memory. The third highlighted effect is the redundancy effect, which involves duplicating information (for example, reading text from a slide that is already written) creates an unnecessary burden, as the brain is forced to expend resources comparing identical data streams.

Cognitive load theory posits that the effectiveness of learning and intellectual activity directly depends on the balance between types of load. The primary task of an educational content or interface designer is to minimize extraneous load, optimize internal load, and stimulate relevant load, taking into account the strict limitations of human working memory.

In contemporary scientific research, eye-tracking plays a key role in objectively evaluating the effectiveness of visual content [10] – a technology that records gaze coordinates, pupil movement dynamics, and the duration of fixations during a user’s interaction with a visual stimulus.

Eye-tracking is based on the «Eye-Mind Hypothesis», formulated by M. Just and P. Carpenter [11]. According to this hypothesis, there is a direct correlation between the point of gaze fixation and the process of cognitive information processing at that point. Analysis of eye movements allows for the reconstruction of the process of cognitive resource allocation (according to J. Sweller’s Cognitive Load Theory) and the identification of stages of information encoding.

The following metrics are typically used to evaluate visual content in monographic studies:

- fixations are periods of relative eye rest (lasting 100 to 500 ms) during which information is processed. A large number or duration of fixations on a specific element may indicate its high significance or, conversely, difficulty in perception;

- saccades characterize rapid, jerky eye movements between fixations. Analysis of saccades helps understand the information-seeking strategy and the logic of “scanning” the interface;

- time to First Fixation (TTFF) determines the speed of detecting a specific object, which is critical for assessing the visibility of safety elements or warning signals;

- areas of Interest (AOI) are specific zones of visual content that are analyzed separately to compare the effectiveness of different elements (e.g., a graph versus a text description).

The results of eye-tracking studies are presented in the form of heat maps and gaze plots. The first is a color-coded graphical representation of fixation density. «Hot» zones indicate areas that attracted the most attention, allowing for the validation of the hierarchy of visual elements. The second is a sequence of eye movements reflecting the chronology of content perception. This is important for analyzing whether the user’s gaze path aligns with the logic intended by the developer.

The eye-tracking method transforms the subjective assessment of a visualization’s «usability» into objective quantitative data. This allows for the design of systems with minimal cognitive load, ensuring a quick and error-free human response to complex digital stimuli.

Heatmaps reflect the intensity of the user’s attention by overlaying a color gradient on the image.

The formation of mental models during interaction with information systems. The term «mental model» was first proposed by Kenneth Craik in 1943 and later

developed by Philip Johnson-Laird[3]. A mental model is an internal simulation of external reality that is stored in long-term memory in the form of interconnected cognitive schemas.

Unlike formal mathematical or computational models, mental models are characterized by: dynamism, as they constantly evolve through learning and experience; functionality – they are not necessarily exact copies of reality, but must be sufficiently useful for decision-making; and limitations, as they depend on working memory capacity according to J. Sweller’s Cognitive Load Theory.

The process of constructing a mental model goes through several stages:

– perception through dual coding: the user receives visual and verbal stimuli. According to A. Paivio, the combination of text and graphics accelerates the creation of an initial «mental image» of the system;

– assimilation: new data is compared with existing knowledge. If the system is similar to previously known ones (for example, it has a familiar «trash can» icon), the model is formed more quickly;

– experimental verification: the user performs an action and observes the system’s response. At this stage, A/B testing of interfaces is critical to identify which elements contribute to a correct understanding of the system’s logic;

– aggregation and automation: individual cognitive schemas are combined into a complex model, allowing tasks to be performed with minimal conscious attention.

There are three types of models, and aligning them is the goal of successful design: the design model reflects how the developer sees the system and is based on algorithms and code; the system image indicates how the system is presented through the interface, documentation, and illustrations; the user’s mental model indicates what is formed in a person’s mind based on interaction with the «system image.»

Critical errors or crises often arise when the user’s mental model does not match the actual logic of the system – that is, the design model.

High-quality visualization acts as a «bridge» between a complex mathematical model (such as the ViT neural network) and human consciousness. The use of concept mapping methods allows us to make the connections within the system explicit (visible), helping the user to build an adequate mental model more quickly, as confirmed by eye-tracking data.

When analyzing the cognitive mechanisms underlying the effectiveness of infographics – including dual-channel information processing, working memory limitations, and the formation of mental models – perceptual mechanisms play a central role.

Within the fields of cognitive psychology and ergonomics, the study of perceptual mechanisms is critical for understanding how humans extract, structure, and interpret visual information. For this section of the monograph, this description should be based on a synthesis of the physiology of perception and cognitive theories of information processing.

Perceptual mechanisms are the set of processes through which sensory stimuli are transformed into meaningful mental images. Unlike simple sensation (the

registration of light or color), perception involves interpretation based on the subject's prior experience and expectations.

The process of perception unfolds in two opposing directions: bottom-up processing – analysis begins with the basic physical characteristics of the stimulus (lines, angles, color, contrast). This is an automatic process driven by the object's characteristics. Top-down processing characterizes the formation of an image under the influence of knowledge, context, and cognitive schemas. For example, an experienced researcher is more likely to recognize an anomaly on a wavelet graph because their perceptual mechanisms are «tuned» to specific patterns.

Before attention is consciously directed toward an object, preattentive mechanisms are at work. They allow the brain to instantly (in <200 ms) detect specific visual cues, such as:

- color contrasts;
- line orientation (horizontal/vertical);
- motion and intensity. Effective visualization in IT systems must utilize these mechanisms to highlight critical events so that they «pop out» (pop-out effect) even before the operator fully becomes aware of them.

One of the basic mechanisms of perception is the grouping of elements into coherent structures. Key Gestalt principles include:

- proximity: objects located close together are perceived as a group;
- similarity: elements of the same shape or color are mentally grouped together;
- continuity: the eye follows lines or curves, seeking smooth transitions;
- closure: the brain tends to «fill in» missing fragments of shapes to create a complete image.

Perceptual mechanisms are closely linked to the limitations of working memory. An excessive number of small details or a chaotic arrangement of elements overloads the perceptual channel, leading to an increase in extraneous cognitive load (according to J. Swellers). The use of the eye-tracking method allows for the objective recording of how these mechanisms work: prolonged fixations often indicate areas where perceptual recognition is difficult due to the complexity of the visual geometry or low image quality.

Research findings

Based on an in-depth analysis of the psychological foundations of visualization, an examination of scientific approaches, and the methodological tools used in contemporary psychological and educational research, it can be concluded that infographics are effective in education.

To achieve this goal, we integrated principles from cognitive psychology, visual communication theory, pedagogy, and digital educational technologies to form a comprehensive understanding of infographics as a tool for optimizing educational activities.

Analytical research has established the principles for creating effective infographics.

The effectiveness of infographics as a teaching tool depends to a large extent on adherence to certain principles of their creation, which are based on the patterns of information perception.

The main principles include: the principle of hierarchy, according to which information should be organized by level of importance. Visual hierarchy is achieved through the size of elements, contrast, layout, and typography. The principle of cognitive economy involves minimizing unnecessary elements that do not convey meaning. Excessive detail complicates perception and reduces learning effectiveness. The principle of integration states that textual and graphic elements must interact to form a unified semantic structure. Separating these components in space or time can reduce the effectiveness of perception. The principle of visual consistency ensures unity in style, color scheme, fonts, and graphic elements, which contributes to the formation of a holistic perception of information. The principle of audience relevance emphasizes that infographics must take into account the level of preparation, cognitive characteristics, and learning needs of learners.

In the educational process, infographics can serve various functions, which leads to their classification based on several criteria.

1. By functional purpose:

- explanatory – explains the nature of phenomena or processes;
- comparative – demonstrates differences between objects;
- process-based – depicts a sequence of actions;
- statistical – presents quantitative data;
- structural – demonstrates relationships between elements.

2. By presentation format:

- static;
- dynamic;
- interactive.

3. By level of complexity:

- basic (for general familiarization);
- analytical (for in-depth study);
- expert (for professional use).

Infographics have significant educational potential, which manifests in the following aspects: improving learning effectiveness – in particular, visualization promotes a better understanding of complex concepts and reduces the time needed to master the material; fostering the development of analytical thinking – stimulating the ability to analyze, generalize, and interpret information; it helps develop visual literacy, as learners learn not only to perceive but also to create visual messages; it stimulates cognitive activity by increasing motivation to learn and encourages students to engage in active work.

Infographics should be viewed as a formalized information model that can be presented in the form of:

$$IG = \{D, V, S, C\}, \quad (1)$$

where D – data set;

V – visual variables (color, shape, size);

S – relationship structure;

C – interpretive context.

This model describes infographics not merely as a graphic image or design element, but as a structured cognitive system that organizes, conveys, and facilitates human perception of information. It formalizes the process of interaction between the visual representation of data and the user's cognitive mechanisms.

This model implies that an infographic consists of four interrelated components.

Component D – Data Set. This component represents the informational content, i.e., all the data that needs to be conveyed to the user.

The data set may include: statistical indicators; textual information; numerical values; time series; process diagrams; analytical relationships. In other words, D is «what exactly needs to be communicated».

Component V – Visual Variables. These are means of visually encoding information, such as color, shape, size, contrast, texture, spatial arrangement, and typography. Visual variables determine: what the user will pay attention to, which elements will dominate, and how quickly the information will be recognized. For example:

- red color → emphasis;
- large size → importance;
- thick line → priority.

In other words, V is «how information is presented visually».

Component S – Structure. This element describes: the logic behind the infographic's design, the relationships between elements, the hierarchy of information, and the order of perception. Structure determines: the reading sequence, cognitive navigation, and cause-and-effect relationships.

For example:

- flowchart;
- tree;
- cyclical model;
- modular structure.

So S is «how the elements are connected to each other».

Component C is the context of interpretation (Context). Context determines: for whom the infographic is created, under what conditions it is perceived, what prior knowledge the user has, and what task is being performed. Context may include: the audience's level of preparation, educational background, cultural characteristics, presentation format, and technical environment.

For example.

The same infographic will be perceived differently by:

- a student;

- a professional;
- a schoolchild;
- a designer.

C represents «under what conditions and by whom the information is interpreted».

The infographic effectiveness model can be described by the function:

$$E = f(R, L, C_1), \quad (2)$$

where R – level of understanding;

L – cognitive load;

C₁ – user's cognitive characteristics.

The formula describes what determines the effectiveness of an infographic. The R component stands for «Understanding». It measures how well the user has understood the information, whether a correct mental model has been formed, and how quickly the content is interpreted. The higher the level of understanding (R↑), the more effective the infographic is.

Component L – Cognitive Load. This refers to the amount of cognitive resources a user expends to process information. Excessive cognitive load occurs when there is an overload of details, a chaotic layout, excessive colors, or complex navigation. If L decreases, the effectiveness of the infographic increases.

Component C₁ - user cognitive characteristics. These are an individual's personal traits, including knowledge level, experience, thinking style, visual literacy, working memory capacity, and analytical ability.

Thus, the model emphasizes that the same infographic can be effective for one audience and difficult for another. The model demonstrates that infographics are not merely graphic design, but that their effectiveness depends on the cognitive interaction between:

- data;
- visualization;
- structure;
- the user.

The scientific significance of the model lies in the fact that it allows for formalizing the infographic design process and evaluating the quality of visualization, predicting the effectiveness of perception, building adaptive multimedia systems, and, importantly, integrating AI and eye-tracking analysis.

Thus, the proposed formalization treats infographics as a cognitively oriented information system, the effectiveness of which is determined not only by the content of the data, but also by the manner of its visual representation, the structure of relationships, and the user's cognitive characteristics. The model demonstrates that optimal infographics should ensure a high level of information comprehension with minimal cognitive load.

Empirical studies show that the use of infographics increases retention by 20-40%, thereby reducing information processing time and improving the ability to transfer knowledge. Infographics also promote the development of systematic thinking.

Studies [12] have found that structured visualizations significantly improve data interpretation compared to textual descriptions.

As a tool for external validation of the proposed visualization models, we propose a cognitive-didactic model diagram: «Infographics → Attention → Cognitive Load → Learning Effectiveness.» The cognitive model of the impact of infographics on learning effectiveness is presented in Figure 1.

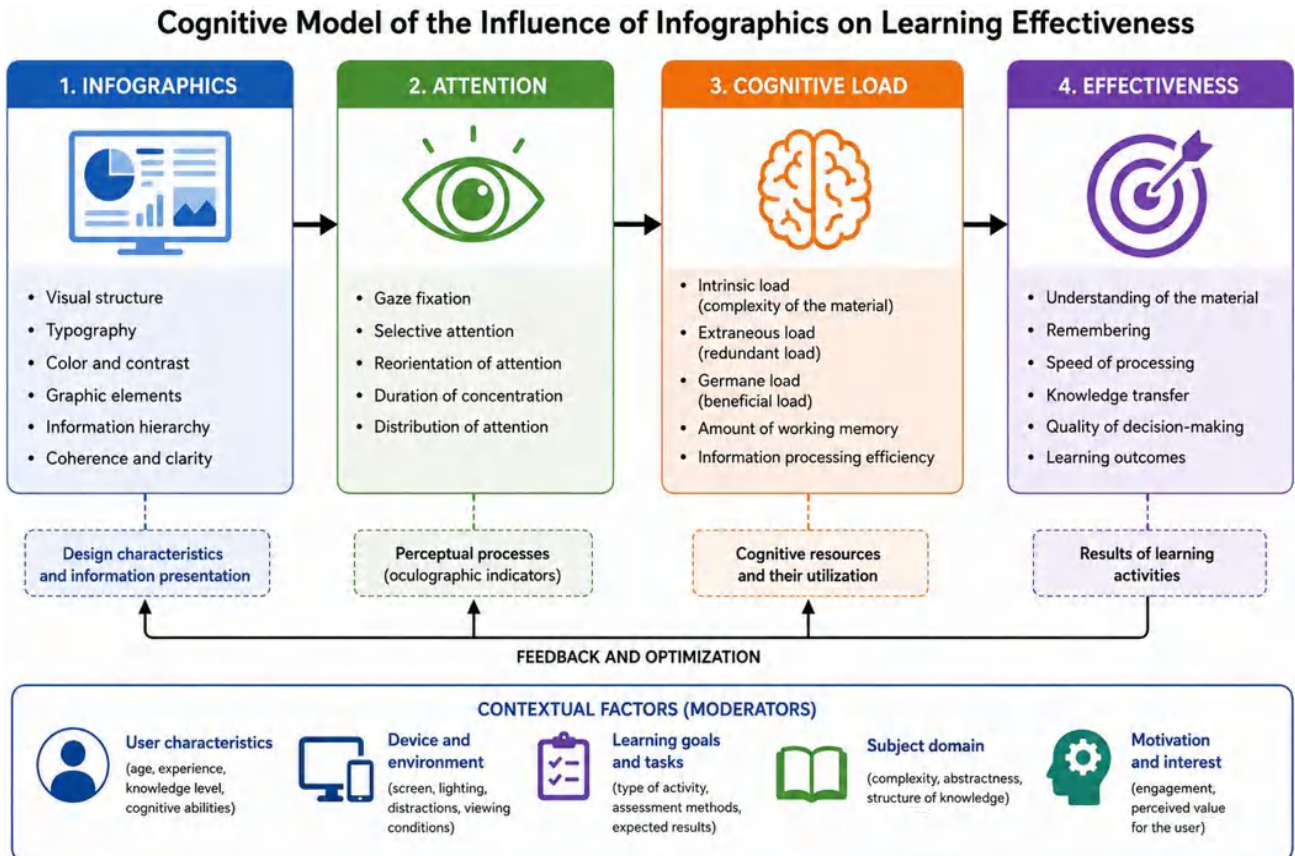


Figure 1 – A cognitive model of the impact of infographics on learning effectiveness (developed by the author)

The interpretation of the model can be presented as follows.

Infographics serve as the entry point and act as the primary informational stimulus that determines attention allocation, cognitive navigation, and the structure of perception. It should be noted that the quality of the design directly influences all subsequent stages.

Attention characterizes the perceptual level and is an intermediate variable that moderates the interaction between infographics and cognitive processes, determines which specific elements will be processed, and depends on: contrast, composition, and visual cues. Eye-tracking results (Heat Maps, Gaze Plots) are applied here.

Cognitive load characterizes information processing. This is the central level of the model, where interpretation, integration, and knowledge formation take place.

The balance between intrinsic (complexity), extraneous (noise), and germane (learning) factors determines learning effectiveness.

Effectiveness is the final outcome, manifested in the quality of learning, the speed of information processing, long-term retention, and the ability to transfer knowledge.

The cognitive model of the impact of infographics on learning effectiveness allows for a systematic description of the relationship between the visual presentation of information, attention mechanisms, cognitive load, and the effectiveness of learning material assimilation. The analysis revealed that infographics serve not only as a means of visualizing information but also as a cognitive tool for organizing learning activities.

The results confirm the feasibility of using infographics as an effective means of cognitive support for the learning process in the context of intensifying information flows. The proposed model can serve as a theoretical foundation for further research in the fields of visual communication, multimedia learning, digital pedagogy, and cognitive design.

Conclusions

Infographics are a complex cognitive-communicative system that combines visual, verbal, and structural components. Their effectiveness stems from their alignment with cognitive information-processing mechanisms and their ability to optimize the learning process in an environment of information overload.

Thus, infographics are an effective tool for optimizing the learning process in conditions of information overload. Their use allows for improving the quality of knowledge acquisition, developing cognitive abilities, and fostering modern educational competencies.

In the education system of the information society, infographics serve as a powerful tool for visual communication, optimizing the processes of perception, understanding, and memorization of information. They help overcome the barrier of complex educational material, making it accessible and easy to grasp without losing scientific depth. Further research in this area should focus on developing methods for the automated generation of educational infographics based on intelligent algorithms for analyzing text content.

References.

1. Mayer, R.E. (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678>.
2. Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>.
3. Paivio, A. (1990). *Mental representations: A dual coding approach*. Oxford University Press.
4. Ware, C. (2013). *Information visualization: Perception for design* (3rd ed.). Morgan Kaufmann.
5. Knaflic, C.N. (2015). *Storytelling with data: A data visualization guide for business professionals*. Wiley.

6. Morze, N.V., Vember, V.P., Barna, O.V., & Kuzminska, O.H. (2014). Informatyka-6: navchannia cherez diialnist [Informatics-6: learning through activity]. *Informatyka ta informatsiini tekhnologii v navchalnykh zakladakh*, (4), 16-24.
7. Bykov, V.Yu. (2019). Tsyfrova transformatsiia suspilstva i rozvytok kompiuterno-tekhnolohichnoi platformy osvity i nauky Ukrainy [Digital transformation of society and development of computer-technological platform of education and science of Ukraine]. *Informatsiino-tsyfrovyi osvittii prostir Ukrainy: transformatsiini protsesy i perspektivy rozvytku* (p. 20-26). NAPN Ukrainy.
8. EdEra. (n.d.). EdEra – studui distantsiino [EdEra – study remotely]. <https://ed-era.com/>.
9. Prometheus. (n. d.). Prometheus – naikrashchi bezkoshtovni onlain-kursy Ukrainy ta svitu [Prometheus – the best free online courses in Ukraine and the world]. <https://prometheus.org.ua/>.
10. Duchowski, A.T. (2017). *Eye tracking methodology: Theory and practice* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57883-5>.
11. Just, M.A., & Carpenter, P.A. (1980). A theory of reading: From eye fixations to comprehension. *Psychological Review*, 87(4), 329-354. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.4.329>.
12. Cairo, A. (2013). *The functional art: An introduction to information graphics and visualization*. New Riders.

INTEGRATION OF A STANDARDIZED BOULDERING BOARD INTO AN ARCHITECTURE FOR SIMULTANEOUS TRAINING MANAGEMENT

Guryev I.

Full-time professor, Department of Multidisciplinary Study,
Engineering Division, University of Guanajuato
ORCID: 0000-0001-6014-5912

Gurieva N.

Full-time professor, Department of Digital Art and Management,
Engineering Division, University of Guanajuato
ORCID: 0000-0002-1366-1292

***Abstract.** Standardized training boards such as the MoonBoard are the most popular tool for automated indoor boulder training. However, their control systems are normally implemented as isolated devices with no integration into gym management software. In this study we have developed a low-cost, open-source architecture that based on ESP32 LED matrix controller managing a 198-hold, 18×11 bouldering board with a RESTful web application that unifies member management, attendance tracking, and training session control under a single interface accessible to multiple users simultaneously. In this study, we have introduced the real-time synchronization of training state across concurrent web clients by means of polling-based protocol using the controller's state-update requests. The board can be operated both with its own basic frontend via direct client connection within the local network, as well as by means of the gym management software via proxy integration of the board's HTTP API. This, naturally, eliminates the need for separate Bluetooth pairing or proprietary mobile applications. A lightweight JSON/HTTP polling scheme with 1.5-second period was demonstrated to be short enough to achieve nearly flowless synchronization across multiple browser sessions. The system was deployed and validated at a small indoor climbing facility over a two-month period. Results indicate that the integrated architecture reduces front-desk administrative time, improves training efficiency and, due to high accessibility, increases the usage of the training board in general.*

***Keywords:** indoor climbing, IoT, ESP32, LED training board, gym management system, bouldering, MoonBoard, real-time synchronization.*

Introduction

Indoor climbing has shown remarkable growth over the past decade. The number of dedicated indoor climbing facilities in the United States alone exceeded 600 by 2023, up from approximately 400 in 2017, with similar trends observed across Europe and Latin America [1]. The professionalization of training methodology in climbing has accelerated significantly, since the inclusion of sport climbing in the 2020 Tokyo Olympic Games [2].

A central tool in the contemporary climber's training is the standardized training board, a fixed-angle overhanging panel equipped with a predefined set of holds that permits the creation and international sharing of specific problem sequences.

The MoonBoard, originally conceived by professional climber Ben Moon in the late 1980s and commercially released in 2016 with LED hold-indication technology, has become the dominant format for this category of equipment, with installations in thousands of facilities worldwide [3]. Its 2016 layout was the first commercially available LED training board, and successive versions (2017, 2019, 2024) have maintained a standardized 198-hold configuration within an 18×11 matrix.

Despite their widespread adoption, MoonBoard installations and training boards in general have historically operated in isolation from the operational software infrastructure of climbing facilities. Control is mediated through a proprietary Bluetooth-based mobile application, which requires individual device pairing and prevents simultaneous multi-user access. Route libraries are maintained in a centralized cloud database that cannot be replicated locally, creating a dependency on internet connectivity for basic training functions. No integration with membership management, check-in logging, or session duration tracking has been commercially available.

Simultaneously, the management software market for climbing facilities has grown considerably. Platforms such as Rock Gym Pro (now Onsite Pro), Approach, and Community offer cloud-based membership, point-of-sale, and waiver management, but remain entirely decoupled from training hardware [4, 5]. In result, a trainer supervising a MoonBoard session must operate two entirely independent systems, namely a mobile app for board control and a desktop or web application for member management with no data flow between them.

Aim of the investigation

This paper addresses that gap by presenting an integrated architecture in which a custom ESP32-based firmware replaces the proprietary MoonBoard control chain, exposing a local HTTP API that is proxied through a FastAPI-based gym management backend. The contribution is both technical demonstrating a viable synchronization protocol for multi-client LED state management, and operational, showing that the integration reduces workflow friction at the gym front desk while preserving full functionality of the training board for instructors.

The purpose of the research is to design, implement, and validate a low-cost, open-source IoT architecture that integrates an ESP32-based LED bouldering board controller with a web-based gym management system, enabling simultaneous multi-client training session control and member administration through a unified interface. This determined the following particular tasks:

- develop ESP32 firmware that exposes the bouldering board's LED matrix control via a local RESTful HTTP API supporting multiple training modes;
- design a FastAPI-based backend proxy layer that bridges the embedded controller with a membership management system, handling authentication, attendance tracking, and session logging;
- implement a polling-based multi-client synchronization protocol to maintain consistent training timer state across concurrent browser sessions;

- build a staff-facing web interface integrating board control and member management within a single dashboard;
- deploy and validate the integrated system in a real climbing facility, evaluating synchronization accuracy, operational impact, and overall hardware replicability.

Main part

1 State of the art

Training Load and Technology in Indoor Climbing.

Climbing’s physiological demands have been a significant subject in recent literature. The early work [6] set out the basic cardiovascular and metabolic profile of the activity, and subsequent studies have narrowed the focus to the strength-endurance demands that distinguish bouldering from lead climbing. In a systematic review [7], confirmed what many coaches assume in practice: grip endurance and upper-body pulling strength dominate performance outcomes in sport climbers. A more recent contribution comes from Dindorf [8], who applied near-infrared spectroscopy (NIRS) sensors to 42 climbers performing dead-hangs. Their data showed that acute and cumulative forearm fatigue can in fact be tracked in real time, which opens the door to objective monitoring in climbing-specific settings.

Sensor networks are another active area. Rum et al. [9] built an IMU-based system to capture body-segment kinematics during wall sessions, and Breen et al. [10] went a step further, pairing wearable physiological monitors with video to produce microlocation-specific biometric profiles on a competition route. In a follow-up review, Breen [11] surveyed five sensor categories used in climbing research, namely body movement, respiration, cardiac activity, eye-gazing, and skeletal muscle monitoring. They argue that wearable data can give coaches and climbers actionable, science-grounded feedback to put alongside the more familiar subjective assessment.

Standardised Board Training and Machine Learning.

Because the MoonBoard hold layout is fixed, it has become an attractive testbed for machine learning. Dobles [12] was an early example, applying supervised classifiers to predict route difficulty directly from hold positions. Tai et al. [13] built on this with graph neural networks that capture spatial relationships between holds rather than treating positions as a flat feature vector. Stapel [14] took a different approach, proposing an automated grading and route-generation pipeline based on affordance-style hold geometry descriptors. Petashvili and Rodda [15] tested how well such models transfer between board setups, and reported that cross-setup generalization remains hard, mostly due to differences in hold geometry. A more integrated approach is given by Türedioğlu [16], who combined route planning and difficulty estimation within a single model-based framework for indoor bouldering.

All these approaches assume structured route data is available, namely hold positions, grades, and setter metadata, and that this data can be stored, retrieved, and tied back to specific climbers. Without it, training-load monitoring over time becomes

impractical. The bottleneck, then, is not the modelling itself but the lack of any integration layer between the board controller and the membership system in which climber identities and session histories are stored.

IoT and Embedded Systems in Sports Facility Management.

IoT techniques are by now well established in smart-building control and, more recently, in sport facility monitoring. The ESP32 microcontroller from Espressif Systems, a dual-core 240 MHz SoC with on-board Wi-Fi and Bluetooth, is one of the platforms most often used in this kind of project, mainly because it is cheap and capable enough for non-trivial workloads. Its mix of processing power, wireless support, and flexible GPIO suits it well to embedded equipment for sports.

LED matrix control for interactive training is not new in itself; reactive training walls and cognitive-motor training platforms have used the idea for years. What is more recent is the combination of an LED matrix with a RESTful HTTP API served directly from the microcontroller, without any intermediate gateway. This pattern has become practical thanks to the ESP32's on-chip TCP/IP stack and to readily available libraries such as the Arduino WebServer.

Gym Management Systems and Integration Gaps.

Commercial gym management platforms have become advanced and complex systems, but their scope remains administrative. Rock Gym Pro, which dominates the climbing-specific segment in the United States [5], handles memberships, point-of-sale, scheduling, and digital waivers, all without touching the training equipment itself. Anolla is something of an exception: it incorporates IoT hardware such as access control and visitor counters but does not extend to training boards. To the moment, no published work describes an architecture that puts LED-based training board control directly inside a gym membership management system.

2 System Architecture and Implementation

Embedded Controller (ESP32 Firmware).

The training board itself is a 25° inclined plywood panel of roughly 2.44 m by 3.15 m, populated with 198 standardized climbing holds in an 18-row by 11-column matrix. Behind each hold there is a WS2812B addressable RGB LED, giving independent color control for every position. The LED matrix is driven by an ESP32 microcontroller (ESP32-S3 N16R8 MCU 44 pin), running at 240 MHz with 4 MB of flash.

The firmware is written in C++ on the Arduino framework. It joins the local Wi-Fi network in station mode and runs an HTTP server on port 80, using the Arduino WebServer library. Board state is held in memory as a 198-character string in which each character encodes one of five color values, namely 'k' for black (off), 'w' for white, 'r' for red, 'g' for green, and 'b' for blue. Route data is kept on a microSD card in .mbd files.

A summary of the HTTP endpoints exposed by the firmware is given in Table 1.

Figure 1 shows the resulting four-layer architecture: a physical layer (ESP32, LED matrix and SD card), an application layer (the FastAPI backend on a Raspberry Pi), a presentation layer (the browser-based staff dashboard, member portal, and self-

registration page) and a local interface provided by the board itself via the local network connection. The local interface is indicated as a separate layer since it can be used for the initial WiFi settings as well as to access the board functions without the gym management software (Table 2, Figure 2).

Table 1 – ESP32 HTTP API endpoints exposed by the firmware

Endpoint	Method	Parameters	Description
/get_routes	GET	–	Returns JSON array of saved route names
/set_color	GET	data (198-char)	Updates LED matrix state
/states_update	GET	data (198-char)	Polls state; returns LEDs colors + training timer + training state ('t' or '0')
/ {fname}.mbd	GET	–	Returns raw route data (198 bytes)
/save_route	GET	fname, data	Saves route to SD card
/delete_route	GET	fname	Removes route from SD card
/start	GET	mode, per, dur, routes	Initiates a training session
/stop	GET	–	Terminates the active training session

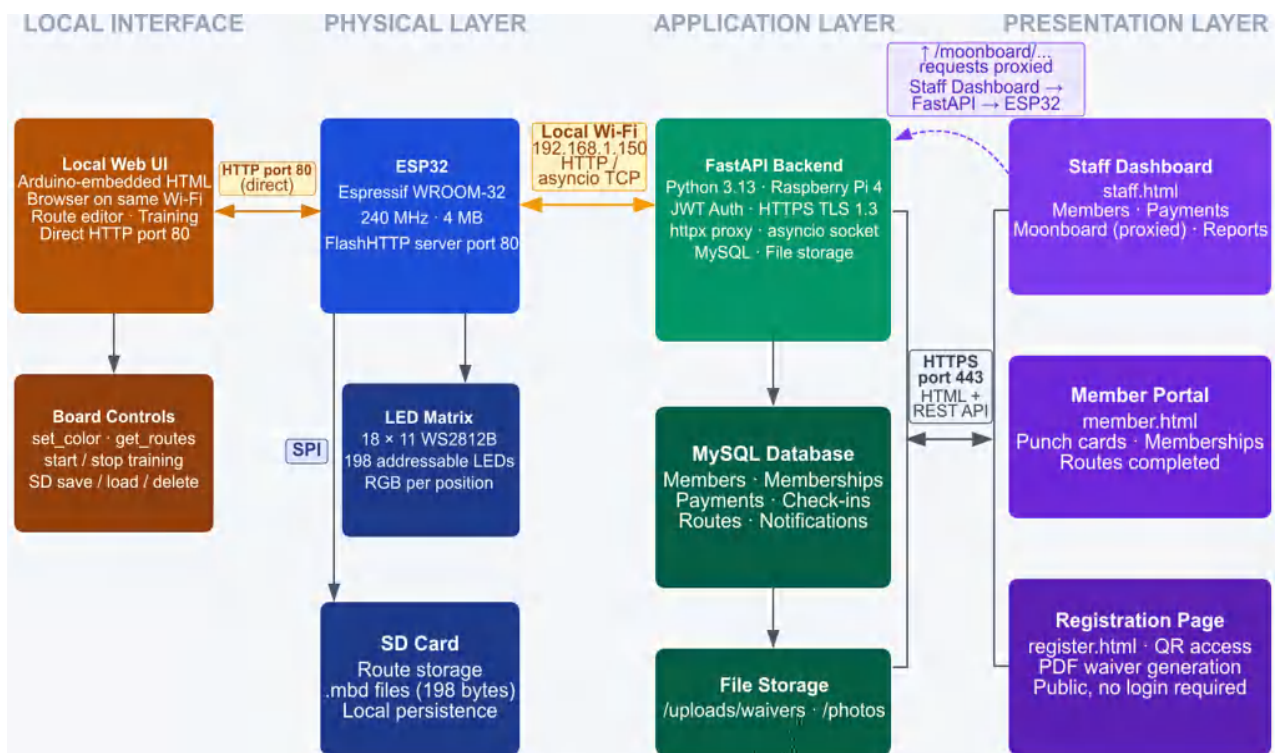


Figure 1 – Integrated IoT system architecture for climbing gym management and LED board control

Table 2 – Training modes and their behavioral descriptions

Mode	Name	Behavior
1	Memory	Sequence of holds presented for determined number of seconds; climber must reproduce it from memory
2	Free	Random single hold illuminated per period
3	Free (pairs)	Random pairs of holds of different colors are illuminated per period (for training in couples)
4	Block	Random single hold illuminated per period. After several periods, all the LEDs are illuminated red, meaning the climber should stay as close to the wall as possible (blocked)
5	Block (pairs)	Block protocol with paired holds of different colors
6	Multi-route	Cycles through a sequence of preselected set of saved routes

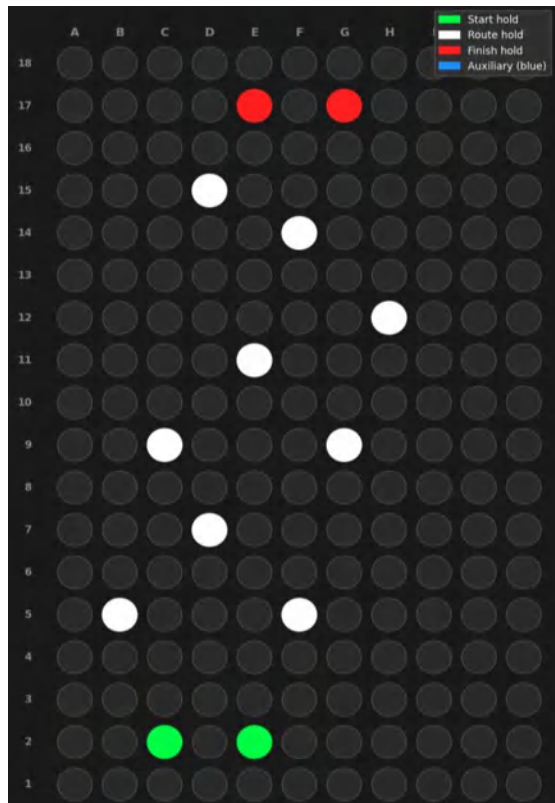


Figure 2 – Interactive LED grid interface – the 18×11 MoonBoard (198 WS2812B LEDs) with a sample route shown. Green = start holds, white = route holds, red = finish holds

Backend Proxy Layer (FastAPI).

The gym management backend is built on FastAPI (Python 3.13), with SQLAlchemy as the ORM and MySQL as the relational store. It runs on a Raspberry Pi 4 under Raspberry Pi OS and is exposed over HTTPS (TLS 1.3, Sectigo certificate) on port 443. Authentication is handled with JWT tokens signed with HS256, and role-based access control separates staff from member roles.

A set of proxy endpoints under `/moonboard/...` forwards requests from the web application to the ESP32, which sits at a fixed local address (192.168.1.150). For most endpoints, the proxy uses the `httpx` async HTTP client. Route loading, however, gave us trouble. The ESP32’s `WebServer` library closes the TCP connection immediately after `server.sendContent()` returns, without sending a conformant HTTP response terminator first. `Httpx`, reasonably enough, raises `RemoteProtocolError` when it receives this. Rather than patch the firmware, we re-implemented the route-loading proxy with a raw `asyncio` TCP socket that reads bytes until the connection closes and then splits the HTTP header from the body manually at the `\r\n\r\n` boundary. This is forgiving of the embedded server’s non-standard behavior and keeps the existing local HTML interface untouched.

Frontend Integration (Staff Dashboard).

The staff-facing web interface is a single-file vanilla JavaScript application, served straight from the FastAPI backend. Its Moonboard section draws an interactive 18×11 LED grid as a CSS grid of 28×28 px circular cells. A small color picker lets the trainer choose a paint color, after which clicking a cell toggles the hold. Route loading,

saving and deletion all go through the proxy API. The training controls expose all six modes, with the period and duration parameters editable from the same panel.

Multi-client synchronization is based on the `states_update` polling mechanism. On the client side, every browser session runs a `setInterval` loop at 1500 ms. On each tick, the client posts its current 198-character board state to `/moonboard/states_update`. If a training session is active, the response includes the remaining time in seconds, encoded as a 4-digit zero-padded string followed by a `t` (for example, "0247t" means 247 seconds left). The client pulls this value out and passes it to a `mbSyncCountdown()` function, which both updates the on-screen timer and resets a local 1-second countdown interval. The intent of this dual-timer setup is straightforward: the poll gives authoritative time, and the local countdown keeps the display smooth between polls. The net effect is that every connected client stays within roughly one polling interval of the server's view of the training timer.

Validation and Results

Deployment Context.

The system was deployed at Roca Viva, a small indoor climbing and bouldering facility in Irapuato, Guanajuato, México. The gym runs with around 60 active members, a staff of three, and a single MoonBoard installation. Before the deployment, the board was controlled exclusively through its local interface, which while permitted a multi-user connections and full control, required a connection from the local network. Member records, meanwhile, were registered in a spreadsheet.

Timer Synchronization Accuracy.

To achieve multi-client synchronization, we opened three browser sessions in parallel on three different devices (desktop, tablet and smartphone), all on the same local network. A 3-minute training session was then started from one of the clients. Timer readouts were recorded by hand every 30 seconds on all three clients, and each reading was compared against the ground-truth value returned by the ESP32's `states_update` response (Figure 3).

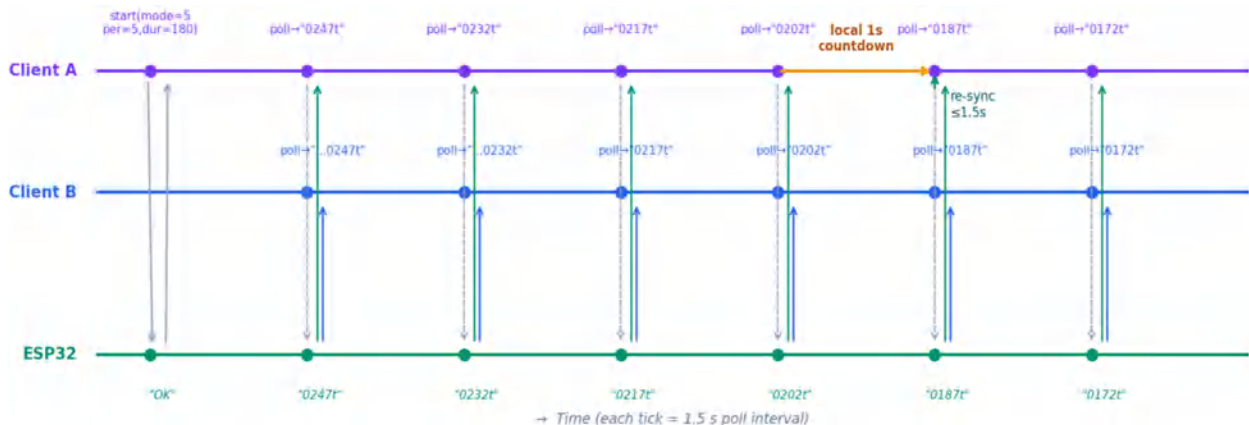


Figure 3 – The `states_update` polling protocol for multi-client timer synchronization. Client A initiates training; Client B joins the next poll and receives the current countdown. Both clients re-synchronize every 1.5 seconds from the ESP32's authoritative value

Across the full session, all three clients stayed within ± 2 seconds of the authoritative timer. The largest divergence we registered was 1.8 seconds, and it occurred right after session started before the non-initiating clients had completed their first synchronization poll (Figure 4). After that initial offset, no drift accumulated for the rest of the session.

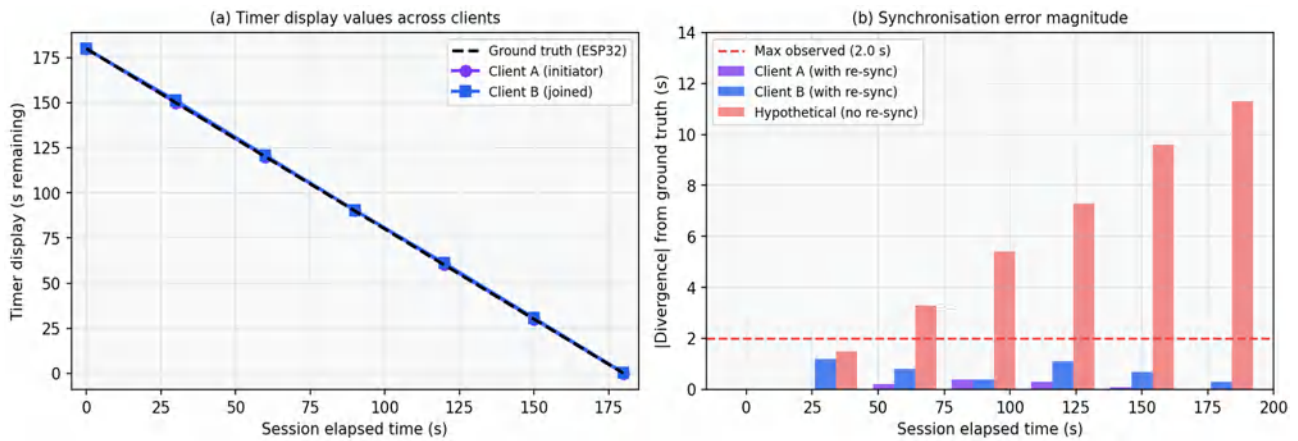


Figure 4 – Timer synchronization accuracy across a 3-minute training session.

Panel (a) shows displayed timer values.

Panel (b) shows absolute divergence from the ESP32 ground truth.

A hypothetical no-resync scenario (red bars) illustrates the drift that would accumulate without periodic correction

Operational Integration Outcomes.

Over the two-months deployment we noted several operational outcomes. First, training sessions, including start time, duration, mode and the staff member who initiated them, are now captured implicitly by the attendance and check-in system, which makes per-member longitudinal session tracking possible without any extra logging step. Second, the staff reported that having membership management and board control in the same browser tab removed the context-switching that previously forced them to move between the local board interface and the spreadsheet. Third, fourteen custom routes were stored on the board’s SD card during the deployment and remained accessible across power cycles. Fourth, on two occasions the ESP32 became unreachable, in both cases the backend returned HTTP 503, and the frontend showed a connectivity warning with a retry button rather than failing silently.

System Cost and Replicability.

Total hardware cost for the embedded controller subsystem, namely the ESP32 module, the LED strip, the microSD breakout, the power supply and the housing, came to roughly USD 35. The backend server is a Raspberry Pi 4 (4 GB), which the facility was already using for other purposes. The software stack is entirely open source, under MIT and Apache-style licences. Taken together, this puts the system well within reach of small climbing facilities for which proprietary integrated solutions are simply too expensive.

Discussion

Synchronisation Protocol and Scalability.

The polling-based synchronisation used here is deliberately simple, and it keeps computational pressure on the ESP32 low. That matters because the device has to handle LED matrix updates, training-mode logic and HTTP requests concurrently. A WebSocket or Server-Sent Events (SSE) design would, in principle, give lower latency, but it would also require either a more capable embedded platform or an intermediate broker, both of which add cost and complexity. We settled on the 1.5-second interval empirically, as a compromise between synchronisation accuracy and request load.

Comparison with Commercial Alternatives.

The commercial MoonBoard ecosystem is built around Bluetooth Low Energy (BLE) for board control and a centralised cloud database for route sharing. That model has two well-known drawbacks, namely pairing with single-device and single-session, and route retrieval depends on an internet connection. Our architecture attends both constraints. Everything runs both on the local network and from the Internet, several browsers can connect at once without any pairing step, and routes live on the board's own SD card. The obvious trade-off is that we lose easy access to the global MoonBoard problem database. A reasonable middle ground would be a hybrid approach in which a background process periodically caches benchmark problem data locally, and we view this as a practical direction for future work.

Firmware Stability Considerations.

During the deployment we observed two cases in which the ESP32 became unreachable. Those were solved by first rigorously debugging the training routines. There were several situations detected when the next stone selection led to an infinite loop due to complex automatic route building procedure. The second failure was caused by a supposed error in the ESP32 core. Even though the `AutoReconnect` of the `WiFi` class was set to `true`, the controller did not perform a reconnection. The solution was verifying the `WiFi` connection status at the end of every loop function execution. In case of lost connection, the reconnection is restarted manually. These two modifications resulted in flawless board operation for more than a week without any detected failures.

Broader Applicability.

We have framed everything here in terms of the MoonBoard, but the architectural pattern itself, namely an ESP32 HTTP API proxied through a larger web backend with polling-based state synchronisation, transfers fairly directly to other LED training boards such as the Kilter Board or the Tension Board, and indeed to other interactive gym equipment. The proxy-within-backend layout also gives a natural place to add authentication, logging, and, further down the line, machine-learning-based route recommendation based on each member's session history.

Conclusion

In this paper there has been described and validated an integrated IoT architecture in which an ESP32-based LED bouldering board controller is connected to a FastAPI gym management backend, supporting multi-client real-time training sessions inside a single membership administration interface. There can be mentioned three main contributions. The first is an HTTP proxy architecture that bridges a resource-constrained embedded server with a more capable web application, while quietly absorbing the embedded server's non-standard TCP handling. The second is a differential state polling protocol that holds timer synchronisation across concurrent browser sessions to under two seconds. The third is a working deployment with hardware costs of roughly USD 35, which we ran for four weeks in a real climbing facility.

References.

1. Climbing Business Journal. (2023). Training board hold systems 2024.
2. International Federation of Sport Climbing. (2021). IFSC 2021 Annual Report.
3. Moon Climbing. (2024). MoonBoard: train hard, climb harder. moonclimbing.com/moonboard.
4. Climbing Business Journal. (2025). Evolutions in climbing gym software: how Redpoint HQ is helping usher in the future.
5. Statista. (2024). Leading climbing facility management software in the United States in 2023. Statista Inc.
6. Giles, L.V., Rhodes, E.C., & Taunton, J.E. (2006). The physiology of rock climbing. *Sports Medicine*, 36(6), 529-545.
7. Ginszt, M., Saito, M., Zięba, E., Majcher, P., & Kikuchi, N. (2023). Body composition, anthropometric parameters, and strength-endurance characteristics of sport climbers: a systematic review. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 37(6), 1339-1348.
8. Dindorf, C., Bartaguiz, E., Dully, J., Sprenger, M., Becker, S., Fröhlich, M., & Ludwig, O. (2023). In vivo monitoring of acute and intermittent fatigue in sport climbing using near-infrared spectroscopy wearable biosensors. *Sports*, 11(2), 37.
9. Rum, L., Sten, O., Vendrame, E., et al. (2021). Design of a sensor network for the quantitative analysis of sport climbing. *Sensors*, 21(5), 1858.
10. Breen, M., Reed, T., Breen, H.M., Osborne, C.T., & Breen, M.S. (2022). Integrating wearable sensors and video to determine microlocation-specific physiologic and motion biometrics – method development for competitive climbing. *Sensors*, 22(16), 6271.
11. Breen, M., Reed, T., Nishitani, Y., Jones, M., Breen, H.M., & Breen, M.S. (2023). Wearable and non-invasive sensors for rock climbing applications: science-based training and performance optimization. *Sensors*, 23(11), 5080.
12. Dobles, A. (2017). Machine learning methods for climbing route classification. Stanford University.
13. Tai, C., Wu, A., & Hinojosa, R. (2020). Graph neural networks in classifying rock climbing difficulties. *NeurIPS Workshop on Machine Learning for Sports*.
14. Stapel, F. (2023). Automated Grade Classification and Route Generation with Affordances on Climbing Training Boards. University of Twente Repository. https://essay.utwente.nl/fileshare/file/94487/Stapel_MA_EEMCS.pdf.
15. Petashvili, D., & Rodda, M. (2023). Board-to-board: evaluating MoonBoard grade prediction generalization. arXiv:2311.12419.
16. Türedioğlu, M. (2023). Model-based route planning and difficulty estimation of indoor bouldering problems. Master's thesis, Middle East Technical University.

PRINCIPLES OF DESIGNING A DIGITAL TWIN AND USER INTERFACE FOR A MACHINE TOOL BASED ON SYSTEM MODELING OF THE GEAR CUTTING PROCESS

Soroka N.

PhD, Doctoral Researcher «Information Systems and Technologies»,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0009-0002-0944-2967

Hrytsai I.

Doctor of Science, Professor,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-3675-5897

Ogirko I.

Doctor of Science, Professor,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-1651-3612

***Abstract.** Industry 5.0, as the next stage in industrial evolution, should put people back at the center of manufacturing processes. This can be achieved through the use of intelligent interfaces, where AI components will work in collaboration with professional operators on the production floor. This paper formalizes the basic principles for designing such interfaces for gear cutting processes.*

***Keywords:** Digital twins, interface, design, gear cutting.*

Introduction

Gear transmissions are essential components of modern mechanical systems and remain fundamental for power transmission in a wide range of industrial applications. In power drives, reducers, gearboxes, and transmission assemblies, they perform the critical function of converting rotational speed, torque, and the direction of motion between interacting components. Owing to their reliability, efficiency, and ability to transmit significant loads, gears are widely employed across virtually all sectors of mechanical engineering.

The automotive industry alone accounts for approximately 80% of total gear production, manufacturing hundreds of millions of gears annually. With global vehicle production reaching tens of millions of units each year, this sector manufactures nearly one billion gears annually. Given additional demand from the aerospace, shipbuilding, robotics, machine tool, and heavy machinery industries, the global production of gears exceeds 1 billion units per year. This production volume highlights the strategic importance of efficient, flexible and sustainable gear manufacturing technologies for modern industrial production systems [1].

The economic importance of gear manufacturing is also reflected in the global gear technology market. The gear manufacturing market size is forecast to increase by USD 137.8 billion at a CAGR of 8.1% between 2024 and 2029.

The increasing technological complexity of modern machines, especially in sectors such as electric mobility, robotics, and aerospace systems, creates growing requirements for transmission precision, noise reduction, efficiency, and operational reliability. Consequently, gear manufacturing technologies must simultaneously ensure high accuracy, flexibility, productivity, and sustainability while maintaining economic efficiency. In response to these challenges, the overall goal of the project is to develop an AI-assisted gear manufacturing technology that significantly improves the efficiency, flexibility, and sustainability of gear production.

Purpose and Objectives of the Study

The purpose of this article is to formulate the basic principles for developing the foundations of artificial intelligence integrated into the gear cutting process to ensure the desired stability of the cutting tool. Also, considering the features of Industry 5.0, design the foundations for implementing digital twins and adaptive user interfaces.

Main section

The primary parameter characterizing the performance of cutting tools is wear, and the main criterion is the width of the wear zone on the rear surface of the cutting edge. To monitor this parameter, various approaches and methods are used:

- physical methods of direct monitoring based on contact and non-contact analysis, which utilize sensors, measuring instruments, and devices;
- indirect observation methods: of cutting forces, temperature in the cutting zone, oscillations and vibrations, power consumption, and the intensity of infrared radiation from the surface of the tool;
- statistical analysis methods for predicting the service life;
- methods of mathematical modeling and optimization of decisions – selection of operating modes, design and geometry of cutting tools, structure of the machining operation.

The latter research direction, in which the set goal can be achieved at the lowest material cost, without conducting complex and expensive experimental studies, and excluding the use of expensive equipment and special tools, is the most rational. The key prerequisite for maximizing the effectiveness of such a solution is the availability of reliable data and validated mathematical models. The methodology for researching complex gear-cutting processes, discussed in this paper and which can serve as a scientific basis for developing AI and a human-centered interface for the “CNC machine-operator” system, was developed at Lviv Polytechnic National University. The distinction and uniqueness of the proposed solution lie in a systematic approach and comprehensive computer modeling that covers all aspects of the processes

involved in the formation of gear surfaces. In particular, a system of graphical-analytical and mathematical models has been developed that describe various secondary processes and phenomena accompanying the cutting and shaping of gear surfaces, the results of which are presented, in particular, in the works [3].

For example, the set of phenomena and associated processes, modeling objects, and the interrelationships between them – from the geometric modeling of the cut layers to the description of their wear using the example of gear cutting with a worm cutter – is shown in Fig. 1.

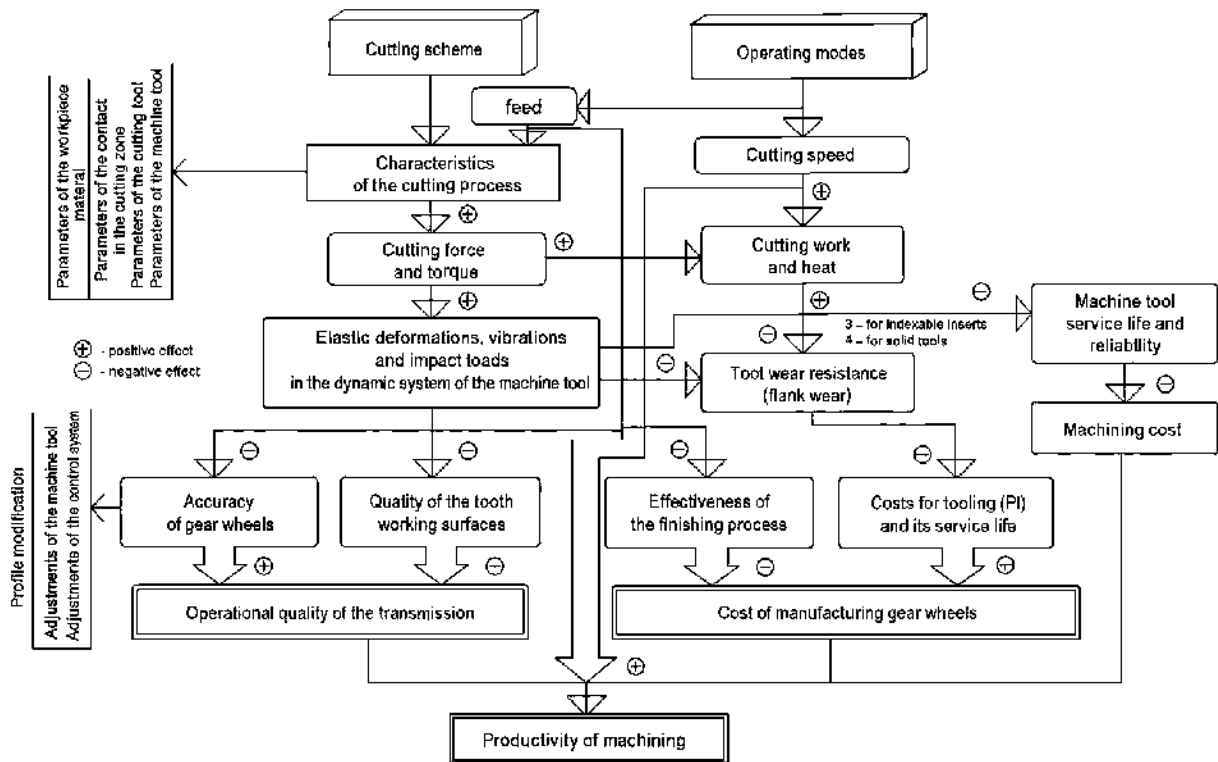


Figure 1 – The “-” sign indicates a negative correlation between the parameters

As can be seen from the flow above, the task of determining cutting parameters and optimal operating conditions is controversial and complex. For instance, to increase the productivity and efficiency of a machining operation, it is necessary to increase the feed rate and cutting speed, which will reduce the machining time and heat generation. However, increasing the cutting speed leads to reduced stability and higher tool wear, as well as creating a risk of vibrations and a deterioration in the quality of the machined surfaces. Increasing the feed rate leads to an increase in cutting force, energy consumption, cutting work, and heat generation, as well as increased oscillations and vibrations, and negatively affects the condition of the machine tool, the tool, and the quality of machining. Thus, taking all these conflicting factors into account is a critical challenge in process design and control.

Under such conditions, the task of determining operating modes that would simultaneously satisfy all the diverse requirements of the operation and yield the highest performance can be solved by intelligently integrating cutting data with predictions of tool condition, which changes over the course of the cutting process—

meaning the creation of a virtual twin of the machine tool with the gear-cutting process. A digital twin, combined with machine learning methods, will make it possible to bring together the entire data set, optimize decisions during the operation preparation stage, monitor the process in real time, control the process, and quickly adjust its parameters in critical situations.

At the same time, to improve the interpretability and transparency of the model, it is important to physically monitor the controlled parameter using a sensor integrated into the cutting process control system.

Modeling the temperature of the cutting wedge

The first step in creating a digital twin is a model that describes the relevant system. Based on the task of monitoring and controlling the gear cutting process according to the tool stability parameter, the factor that has the greatest influence on stability is temperature, as a numerical characteristic of the thermal state of the cutting wedge, and which is one of the main parameters of the cutting process. An increase in temperature in the cutting zone up to a certain limit facilitates the process by reducing the yield strength of the workpiece material; however, beyond this limit, the plasticity of the cut layers, the intensity of heat generation, and the cutting force increase. With a further increase in temperature up to the tool's heat resistance limit, it loses its strength, hardness, and cutting properties.

Depending on the set cutting conditions, temperature is a multi-parameter function in the sequence of processes occurring in the cutting zone: deformation, contact, tribological, force, and thermal processes, which ultimately determine the cutting temperature and the cutting wedge.

The results of temperature calculation and modeling, which can be used to create a digital twin of the power skiving process, are presented in the works [2] in the following form.

The maximum temperature at the contact surface belonging to the tool, as a result of the action of a uniformly distributed, fast-moving ribbon heat source.

$$\theta_{max}^* = \frac{2 \cdot q^*}{\lambda_0} \cdot \sqrt{\frac{b \cdot \chi}{\pi \cdot V}} \cdot K_{sh}, \quad (1)$$

where λ_0 is the thermal conductivity coefficient of the tool material, J/cm·s·°C;

χ is the thermal diffusivity coefficient of the tool material, cm²/s;

q – heat source intensity, J/cm²·s;

b – linear length of the source, equal to the effective width of the blade, mm;

V – cutting speed in mm/s;

K_{sh} – shape coefficient of the high-speed source.

In this formula, the parameter q represents the intensity of heat fluxes on the front surface of the working tooth:

$$q_{\gamma} = \frac{F \cdot V}{60 \cdot C \cdot b} \cdot \frac{1}{\xi}, \quad (2)$$

where $V / \xi = V_{ch}$ – chip feed rate on the rake face in the secondary plastic deformation zone, m/min;

- F – friction force on the rake face, N ;
- C – length of the plastic contact zone, mm ;
- b – chip width, mm .

The variables contained in these relationships were obtained preliminarily based on modeling of the cutting parameters, cutting force, friction, and cutting heat. Graphs of heat fluxes and temperatures on the blades of the skiver cutter during the power skiving process are shown in Fig. 2.

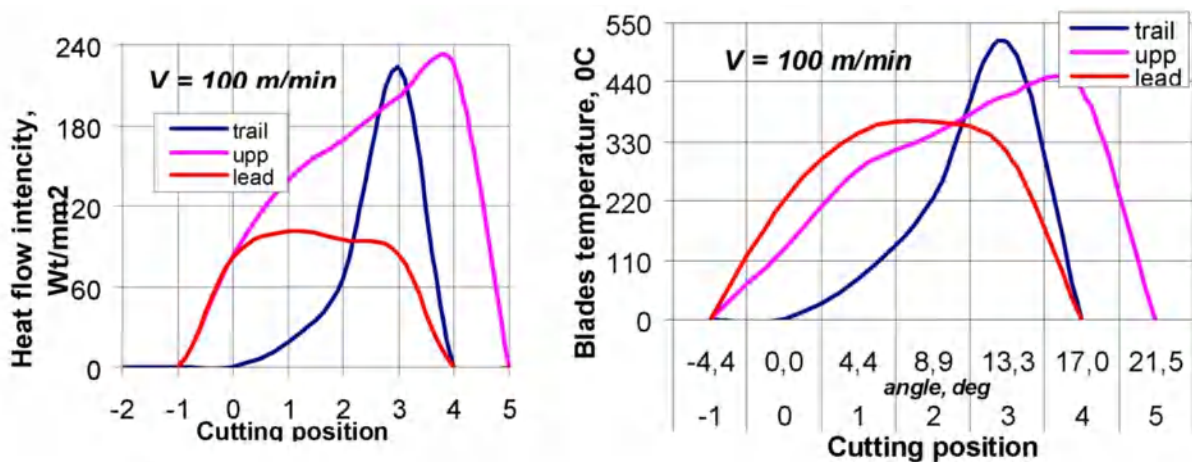


Figure 2 – Heat fluxes (a) and temperature (b) at the tool tooth edges
 $\lambda = 0.094$ cal/cm·s·°C = 0.04 J/mm·s·°C; $\chi = 6.6 - 7.2$ mm²/s; $K_{sh} = 1$.

For the given initial conditions, the maximum temperature reached on the driven side blade does not exceed 540°C and is well below the temperature limit of the hard alloy. However, if we take into account the heat accumulation factor with each machining cycle, then after k revolutions of the tool, the heat generated on this blade, accounting for the balance of thermal processes, will amount to 4.55 J ($k = 22$, Fig. 3) according to the formula, and the final blade temperature will be 1270°C.

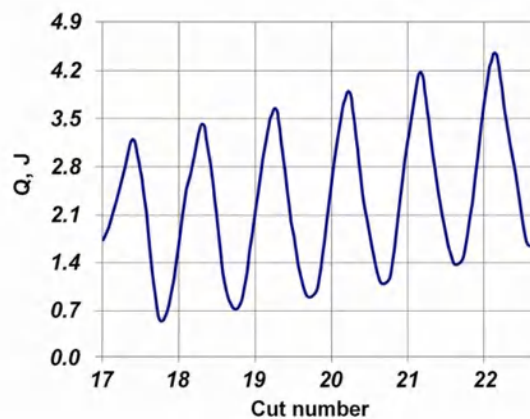


Figure 3 – Balance of thermal processes

This temperature represents the heat resistance limit for the hard alloy; therefore, exceeding it while the machine continues to operate will cause the tool to fail.

Therefore, if the function of controlling the gear-cutting process based on this parameter is assigned to a digital twin, it will be able to terminate the process in a timely manner or adjust the process parameters – specifically, change the cutting modes based on the acquired information and mathematical models [3].

Human-Centric Design

This pillar ensures transparent and user-friendly operation, facilitating adoption by a wide range of operators.

Interface design:

- development of a human-centred visualization platform displaying AI predictions, process status, and optimization decisions in real time [5];

- support for decision-making at automatic, semi-automatic, and manual levels.

Usability testing and optimization:

- evaluation of the UX/UI will be conducted through structured user testing with machine tool operators under both simulated and real operating conditions. Current operators as well as potential candidates from the relevant industrial sector will be invited to participate in the trials in order to collect qualitative feedback and systematically analyse user interaction and behavioural patterns during system operation [2];

- iterative improvements to ensure clarity, trust, and efficient human-system interaction. The methodology follows an iterative Research and Innovation (R&I) cycle. Close integration of experimental results, AI-based optimization, and digital twins ensures rapid feedback and continuous improvement. Each phase is evaluated using quantitative metrics aligned with project objectives, enabling measurable impact. This structured approach ensures the achievement of ambitious yet realistic results, maximizes TRL progress, and prepares the solution for rapid industrial deployment.

Experimental system diagnostics and validation form a central methodological pillar of the project. The experimental programme provides the data required for validation of the manufacturing system, calibration of the digital twin models and generation of datasets for the development and training of AI-based optimisation models.

After manufacturing the individual components and upgrading the machine tool, a structured experimental testing programme will be carried out to characterise the behaviour of the manufacturing system under realistic operating conditions. The testing activities focus on four complementary diagnostic domains describing the behaviour of the complete machining system:

- machine tool accuracy and dynamic behaviour;
- tool behaviour and thermal stability;
- tool-workpiece interaction and local process physics;
- resulting gear geometry and transmission quality.

Machine-level studies will analyse geometric and kinematic accuracy, structural stiffness and dynamic properties of the system. Measurements of vibration behaviour and frequency response will support the modelling of machining stability and the identification of potential vibration phenomena.

Tool behaviour will be characterised through measurements of tool geometry accuracy, thermal stability and operating conditions during machining. These data will support the analysis of how tool deviations and temperature effects influence machining accuracy and process stability.

The interaction between tool and workpiece will be studied by analysing cutting forces, torque, temperature and lubrication conditions in the cutting zone. These studies characterize the local physical processes governing the machining operation.

Finally, the resulting gear geometry and quality will be evaluated through measurements of pitch errors, profile deviations and other accuracy indicators. These measurements provide the basis for analysing the relationship between manufacturing parameters and gear transmission behaviour.

In addition, selected gear samples will be analysed with respect to their dynamic and acoustic performance under realistic operating conditions. These studies examine how manufacturing deviations affect transmission error, dynamic excitation, and noise generation in gear systems.

Dedicated gear test rigs will be used to analyse the dynamic behaviour and acoustic emissions in the gear system. The combination of gear measurements, system-level experiments and numerical models enables a systematic link between manufacturing process parameters and the dynamic performance of the resulting gear transmission.

The experimental data will be integrated into the digital twin framework of the project. Experimental measurements will support the calibration and validation of multiphysics simulation models and provide training data for AI-based optimisation algorithms.

Beyond the validation of the concept, the experimental studies could also generate transferable knowledge on the dynamic behaviour and stability of advanced gear manufacturing systems. These insights will support the future design of more reliable machine tools, improved process control strategies and next-generation gear manufacturing technologies.

This experimental framework provides the essential link between manufacturing process development, digital twin modelling and AI-based optimisation, ensuring that the proposed technologies are grounded in experimentally validated system behaviour [5].

This approach has the potential to transform gear manufacturing from highly specialised production systems into flexible, intelligent manufacturing environments capable of adapting to changing production requirements. Such a transition represents a significant improvement toward more flexible and intelligent gear manufacturing technologies.

The fundamentals of designing digital twins and adaptive interfaces for their subsequent integration into Industry 4.0-5.0 manufacturing processes are presented in Table 1.

Table 1 – Current Status and Proposed Fundamental Principles

Aspect	Current state-of-the-art gear manufacturing	Recommended solutions
Machine architecture	Dedicated gear-cutting machines designed for specific gear types	Universal multi-axis machine platform capable of producing multiple gear types
Cutting tools	Specialized tools (hobs, shaping cutters, skiving tools) for each gear geometry	Single multi-purpose disk milling cutter
Production flexibility	Limited flexibility; tool and machine changes required	Highly flexible programmable kinematic generation
Process optimisation	Mainly empirical parameter adjustment by operators	AI-assisted real-time optimisation using neural networks [5]
Process modelling	Partial empirical models	Integrated multiphysics digital twin
Human-machine interaction	Conventional machine interfaces with limited decision support	Human-centred intelligent interface following Industry 5.0 principles
Production efficiency	Multiple machines and operations are often required	Integrated cutting and finishing on a single platform
Sustainability	High tooling consumption and energy use	Reduced tooling demand and improved energy efficiency

Research findings

The methodological framework of the digital twin will be based on the following principles:

Hybrid structure: a combination of models describing processes and phenomena during gear cutting with machine learning models, using artificial intelligence to adjust process parameters and variables.

Data segmentation by active teeth and cutting tool blades under multi-tooth cutting conditions.

Use of time series. Processes that are the subject of AI, in particular wear, are modeled as the result of sequential processes (RNN/LSTM) preceding the wear mechanism, and the wear process itself is considered during the cutting time as a function of the previous states of the blade.

Real-time integration of the machine's CNC system with a digital twin using a sensor system to monitor the gear cutting process.

Ensuring systematic online updating of models based on machine status information (elastic deformations, cutting forces, vibrations and oscillations, cutting temperature).

Based on the results, the header wireframe for the user interface design is proposed in Fig. 4.

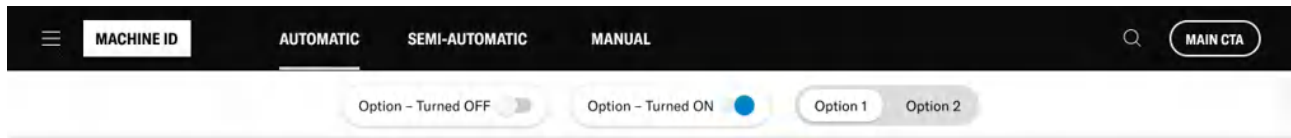


Figure 4 – Conceptual UI/UX solution for the header

In the image above, we can see the following key interface elements, which can be divided into three main groups: status indicators (machine ID, background color), three main mode switches, and a row containing filters and options for fine-tuning the production process.

Conclusions

This study formulates the methodological and technological foundations for the development of a human-centred AI-assisted system for gear cutting processes within the paradigm of Industry 5.0. The proposed approach combines mathematical modelling, digital twin technologies, sensor integration, and machine learning methods to create an intelligent manufacturing environment capable of supporting both automated and operator-assisted decision-making [4].

The research demonstrates that the stability of the cutting tool is determined by a complex interaction of thermal, force, tribological, and dynamic phenomena occurring in the cutting zone. Among these factors, temperature was identified as the dominant parameter influencing tool wear and operational reliability. The developed thermal models make it possible to predict the thermal state of the cutting wedge, analyse heat accumulation effects during repeated machining cycles, and determine critical operating conditions leading to tool degradation and failure.

The obtained results confirm the feasibility of integrating validated analytical and graphical models into a digital twin framework for real-time monitoring and adaptive control of gear cutting operations. Such integration enables continuous assessment of machining conditions, prediction of tool behaviour, timely correction of cutting parameters, and prevention of critical thermal overloads. The proposed hybrid architecture, combining physics-based models with AI-driven learning algorithms, provides the basis for adaptive optimisation under multi-parameter and conflicting process requirements.

An important contribution of the work is the formulation of principles for human-centric interface design in intelligent manufacturing systems. The proposed UI/UX concept supports transparent interaction between operators and AI systems

through real-time visualization of process states, predictive analytics, and optimisation recommendations. The inclusion of automatic, semi-automatic, and manual control modes ensures flexibility of operation and facilitates practical industrial adoption.

The developed experimental framework establishes the necessary connection between physical diagnostics, numerical simulation, digital twins, and AI-based optimisation. The integration of experimental measurements into the digital twin environment enables systematic model calibration, validation, and continuous improvement of predictive capabilities. Furthermore, the proposed methodology creates the foundation for future research aimed at increasing machining stability, improving gear quality, reducing energy consumption, and enhancing the sustainability of advanced gear manufacturing systems.

Overall, the presented approach demonstrates significant potential for the development of next-generation intelligent gear manufacturing technologies aligned with the principles of Industry 5.0, where artificial intelligence acts not as a replacement for the operator, but as a cooperative decision-support instrument within a human-centred production environment.

References.

1. Aggogeri, F., Pellegrini, N., & Tagliani, F.L. (2021). Recent Advances on Machine Learning Applications in Machining Processes. *Applied Sciences*, 11(18), 8764. <https://doi.org/10.3390/app11188764>.
2. Cheng, C.-F., Lin, C. J., & Liu, I.-C. (2025). Mobile Data Visualisation Interface Design for Industrial Automation and Control: A User-Centred Usability Study. *Applied Sciences*, 15(19), 10832. <https://doi.org/10.3390/app151910832>.
3. Hrytsay, I., Pukach, P., & Vovk, M. (2026). The Development of Computer Models of Complex Machining Methods in Mechanical Engineering for Systematic Research, Control and Optimization. *Dynamics*, 6(2), 12. <https://doi.org/10.3390/dynamics6020012>.
4. Ohirko Igor, & Usenko Yana. (2025). Metaverse and metatheory. *Metaverse Science, Society and Law*, 1(1). <https://doi.org/10.69635/mssl.2025.1.1.19>.
5. Soroka, N., & Ohirko, I. (2025). Indirect risks of intelligent interfaces. *Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ»*. (p. 323-326). <https://doi.org/10.36074/logos-06.06.2025.063>

HYBRID MULTIMODAL TEXT DIGITIZATION FOR PUBLISHING AND PRINTING

Kulchytska Kh.

PhD in Engineering, Associate Professor, Multimedia Technologies Department,
Institute of Printing Art and Media Technologies
of the Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-6184-988X

***Abstract.** This paper investigates AI application in text input for the publishing sector. It establishes a classification system for digitization methods based on text complexity and defines key selection criteria. To improve the processing of complex content, the author proposes a hybrid Optical Character Recognition (OCR) and Automatic Speech Recognition (ASR) approach, alongside a specialized multimodal algorithm integrated into publishing workflows.*

***Keywords:** artificial intelligence, text digitization, text complexity group, publishing system.*

Introduction

In the printing industry, artificial intelligence (AI) technology is designed to streamline routine tasks and improve the accuracy and efficiency of prepress processes, such as handwriting recognition, automatic proofreading, and text formatting. However, the most pressing need is to improve text processing efficiency, specifically by replacing manual text entry via keyboard, which requires inputting thousands of characters into a computer. Keyboard typing is a labor-intensive process that requires knowledge of foreign languages, time, attention, and a high level of skill on the part of the operator, and it causes rapid fatigue in the typist. That is why research into text input technologies for PCs via scanning, in a manner natural to humans – such as voice or even thought using neural interfaces – is relevant and promising in the printing industry and requires more detailed analysis.

Purpose and Objectives of the Study

According to experts, the implementation of AI technologies in the printing processes involved in preparing text information can increase productivity by up to 70% and reduce the number of errors by 35-40% [1, 2]. However, the choice of the optimal text recognition and digitization technology depends on many factors: the type of input data, language, volume, and complexity of the text, specifically, the presence of specialized terms, formulas, tables, font formatting, and other text highlights.

Numerous studies have been devoted to the problem of digitization and text recognition, for example, in [3]; however, most of them focus on individual aspects or technologies without providing a comprehensive analysis in the context of printing production. The study [4] examines ways to improve the efficiency of OCR

technologies, but does not account for the specific characteristics of different types of printed materials and does not provide concrete recommendations on selecting technologies based on text characteristics.

The situation is similar with voice text input. Studies conducted on this topic are also relevant to printing [5, 6], although they barely address text complexities such as tables, formulas, and highlighting, and focus more on punctuation placement. The impact of text complexities on voice input technology has been partially investigated in [7]. An analysis of the technologies shows that most text digitization systems have problems with tables, formulas, and punctuation placement, and do not support the Ukrainian language either partially or at all. Replacing the routine task of manual keyboard typing requires an analysis and comparison of the capabilities of AI-based technologies for application in printing.

The problem of integrating text complexity and input technology into the publishing and printing system remains open and requires further research.

Main Section

Text digitization technologies can be divided into several groups based on the type of input data: Optical Character Recognition (OCR) is used to digitize printed text on paper media; Intelligent Character Recognition (ICR) is used for handwritten text; Automatic Speech Recognition (ASR) is used for voice input; audio file transcription is used for pre-recorded audio and video files; Brain-Computer Interfaces (BCI) – for converting brain signals directly into text.

Examples of OCR technology: ABBYY FineReader – one of the best options, effectively recognizes Ukrainian language and punctuation marks; Tesseract OCR – a free open-source solution that also supports the Ukrainian language; Google Drive/Google Docs has built-in OCR, effective with high-quality images; online services: OnlineOCR.net, NewOCR.com.

An example of an ICR (Handwriting Recognition, OCR + AI) system is Google Lens, which recognizes handwritten text using a smartphone camera; Microsoft OneNote Ink-to-Text – converts handwriting into text.

Major ASR solutions: Google Docs (voice input) – works for free in Google Docs via Chrome; SpeechTexter (speechtexter.com) and Dictation.io – online services for voice input; Whisper (OpenAI) – a high-precision AI-based system for speech recognition with support for the Ukrainian language [8]. Audio file transcription includes speaker recognition and automatic formatting features (Whisper, Fathom, Fireflies.ai, Otter.ai, Transkriptor).

Neural interfaces use Brain-Computer Interface (BCI) technology. These are experimental systems that read the user's neural signals and convert them into text (NeuroPort, Brain-to-Text KIT, Synchron Stentrode, Facebook Meta BCI).

Classification of text by recognition complexity. To determine the optimal digitization method, the text information was classified according to the complexity of its recognition. In printing, this includes various types of formatting, the presence of

formulas, tables, and words in a foreign language. Depending on these complexities, the text information was divided into four complexity groups. Simple text with minor typographic complexities (up to 10%) – typographic complexities refer to variations in font saturation, slant, width, size, and typeface – and non-typographic formatting (such as text set in a different style, format, color, or with borders). Examples of printed materials containing text from the first difficulty group include children’s books and fiction. The second group of text information contains up to 25% complexity. This is formatted text with standard elements (typographic and non-typographic highlighting, lists, simple tables), for example, a Ukrainian language textbook for elementary school students. The third group includes complex text with non-standard elements up to 50% (formulas, diagrams, multidimensional tables, words in a foreign language, specialized terminology); an example is technical literature. The fourth group includes complex text containing more than 50% of such elements (text in a foreign language, formulas, complex structured tables), such as dictionaries, a physics textbook, and scientific articles.

Research Methods and Results

The following criteria are proposed for an objective assessment of the technologies’ effectiveness:

- recognition accuracy (%) – the percentage of correctly recognized words;
- processing speed (characters/min) – the average number of characters processed per unit of time;
- resource intensity (points on a scale of 1-10) – requirements for equipment, networks, energy consumption of the technology, and human resources;
- economic indicator – nominal cost (\$/workstation), defined as the average subscription cost.

A mandatory requirement for text digitization technology is the software’s ability to work with Ukrainian-language text and the Cyrillic alphabet, as well as its ability to adapt to various input data formats.

The technologies were tested on ten text fragments, each 1000 characters long, for each complexity group.

Recognition accuracy is the primary criterion for evaluating the performance of text recognition systems and is characterized by the World Error Rate (*WER*) [9]. The *WER* is calculated by comparing two text strings: the recognition result and the original text. This comparison is performed using a dynamic programming algorithm that calculates the Levenshtein distance [10]. The Levenshtein distance is the weighted sum of editing operations with the minimum number of word substitutions (*Z*), deletions (*D*), and insertions (*I*):

$$WER = (Z + D + I) / N , \quad (1)$$

where *N* is the total number of words in the phrase.

With the advancement of speech recognition technologies, the *WER* metric is increasingly approaching zero; therefore, the Word Recognition Rate (*WRR*) metric was used. $WRR = 1 - WER$. The recognition rate was taken as the average value across different software versions.

Based on the obtained data, a mathematical model was developed to determine the effectiveness of text input technology depending on the selected criteria.

The effectiveness of the method (*E*) was calculated using the formula:

$$E = 0.40WRR_{norm} + 0.28S_{norm} + 0.12R_{norm} + 0.18C_{norm}. \quad (2)$$

The weight coefficients for each criterion were determined using the hierarchical analysis method. To do this, the criteria were evaluated on a pairwise comparison scale, pairwise comparison matrices were obtained, and the overall weight of each criterion was determined. The weight coefficients of the criteria, taking into account the significance of each parameter for printing production, were as follows: 0.40 for accuracy (*WRR*), as the most important parameter; 0.28 for speed (*S*); 0.12 for resource intensity (*R*); 0.18 for cost (*C*).

The parameters were first normalized on a 0-1 scale:

$$WRR_{norm} = WRR/100; S_{norm} = S/S_{max},$$

where S_{max} is the maximum speed among the technologies under study.

The resource intensity and cost criteria inversely affect efficiency, therefore

$$R_{norm}=(10-R)/10; C_{norm}=(C_{max}-C)/C_{max},$$

where C_{max} is the maximum cost among all the technologies under study.

Example of calculating the performance of OCR (ABBYY) technology for text of the second difficulty level: normalized parameters

$$\begin{aligned} WRR_{norm} &= 98.5/100 = 0.985, S_{norm} = 3500/4200 = 0.833, \\ R_{norm} &= (10-7)/10 = 0.3, C_{norm} = (250-250)/250 = 0. \\ E &= 0.40 \times 0.985 + 0.28 \times 0.833 + 0.12 \times 0.3 + 0.18 \times 0 = 0.663. \end{aligned}$$

The calculation results are presented in the table 1.

Table 1 – Comparison of text digitization technologies for the second complexity group*

Technology	Accuracy <i>WRR</i> , (%)	Speed <i>S</i> (characters/min)	Resource consumption <i>R</i> , (points)	Cost, <i>C</i> (\$/year)	Efficiency, <i>E</i>
OCR (ABBYY)	98,5	3500	7	165	0,663
OCR (Tesseract)	95,5	2800	5	0	0,809
ICR	90,0	1500	6	180	0,558
ACR (Google)	94,8	4200	8	150	0,755
ACR (Whisper)	96,5	4000	7	120	0,782
Transkriptor	91,0	3000	4	80	0,772

*Neural interface-based technology is currently under development and was therefore not included in the comparison

OCR technology (Tesseract) offers the best performance due to its high accuracy and low cost; however, OCR (ABBYY) provides higher accuracy and speed. For the second group of text complexity, which is the most common in terms of the volume of text information in publications, it is recommended to use ACR (Whisper) voice input technology, which is becoming competitive with OCR (Figure 1). Handwritten text recognition technology is, for now, the least effective.

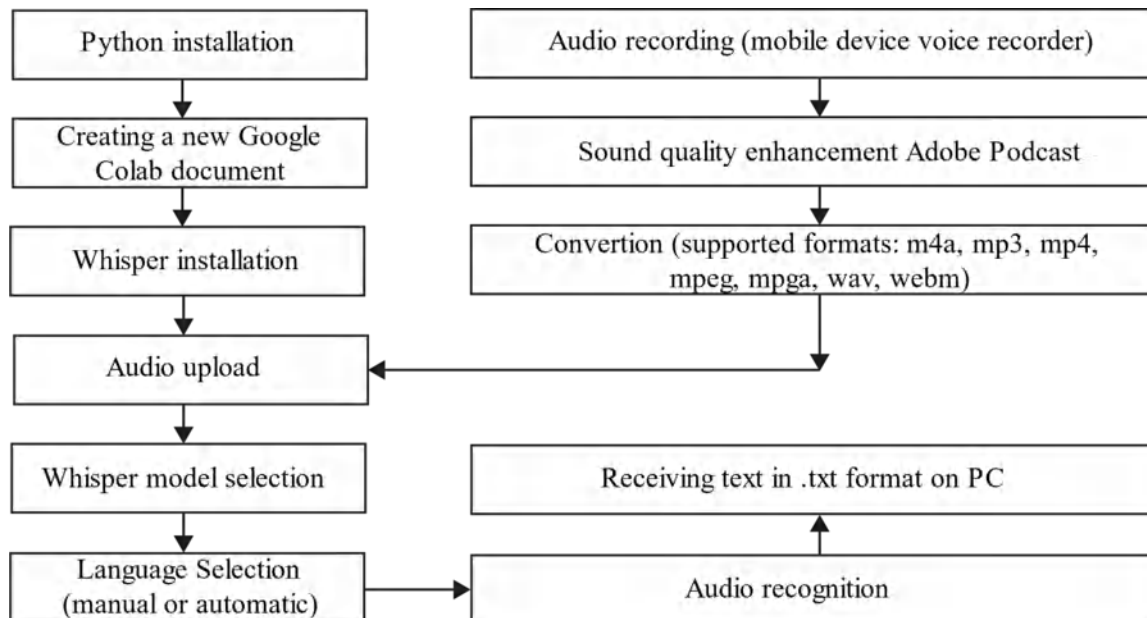


Figure 1 – Diagram of voice-to-text input using the Whisper app

Compared to manual keyboard typing, the technology for entering text into a publishing system using ACR (Whisper medium) voice input is dozens of times faster (the speed of manual typing for the second complexity group is 112 characters per minute).

The Google Colab cloud platform was selected for this study, as it provides access to the powerful GPUs required for the proper operation of the large-v2 and large-v3 models. Unlike local installations or paid applications, this method guarantees high computing power. This stage involves setting up the Python environment and deploying the Whisper library.

Data preparation involves improving audio quality as needed using Adobe Podcast to minimize noise, which is critical for reducing the WER metric. Files are also converted to compatible formats (m4a, mp3, wav, etc.), ensuring the versatility of the input data for the model.

The process is based on interacting with the Whisper model, with the ability to select parameters (language, model variant) depending on whether speed or accuracy is prioritized. The final stage is the automatic generation of text in .txt format, ready for further linguistic or quantitative analysis without additional editing.

As text complexity increases, optical character recognition (OCR) remains the best option, since AI technologies for dictating structured tables in Ukrainian are not yet available (Figure 2). Voice input can be used to fill out tables in Ukrainian using Google Assistant + Google Sheets or Microsoft Dictation (Windows 11, Excel). Table

Transformer also works with Ukrainian tables, but the interface is in English. Markdown, LaTeX, and CSV generate tables in Ukrainian and work seamlessly with the Cyrillic alphabet.

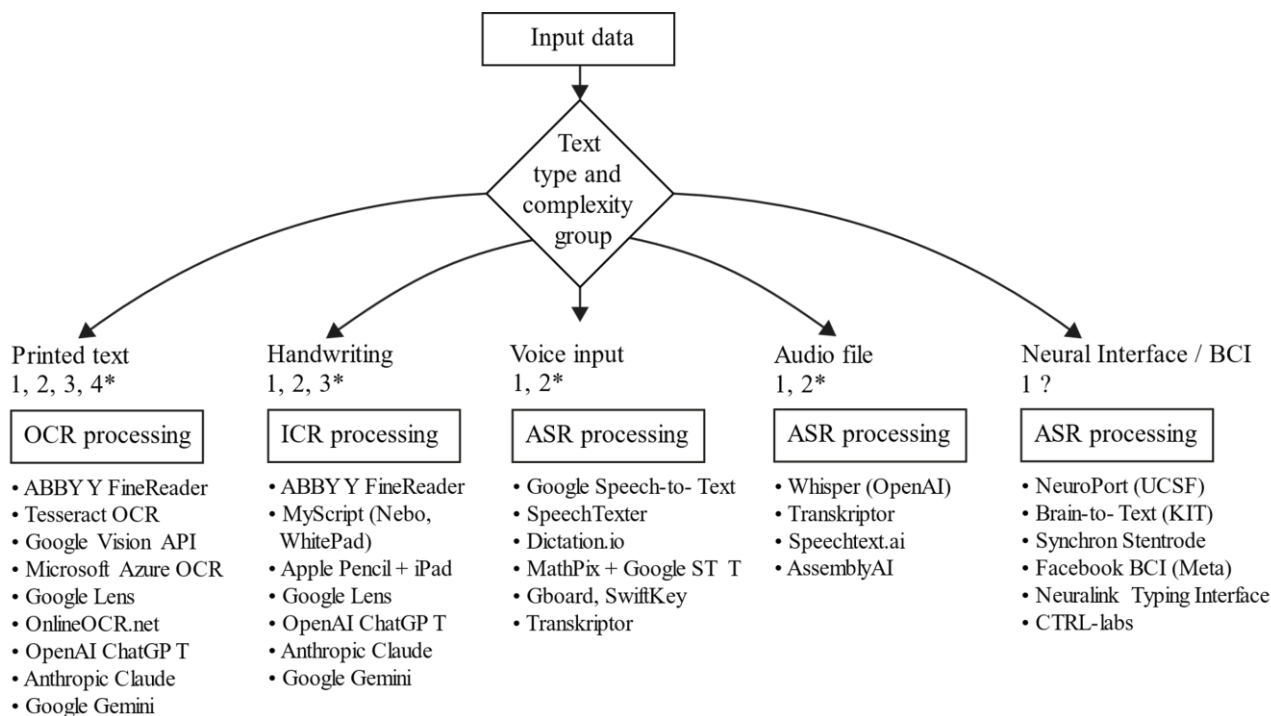


Figure 2 – Selection of text input technology for a publishing system based on the complexity group of textual information (*partial processing)

ICR technology is not suitable for complex handwritten formulas. For typesetting formulas, we recommend Overleaf (LaTeX), which supports the Ukrainian language via the babel and polyglossia packages. If formulas are typeset in Latin script, use ChatGPT (LaTeX), which generates prompts, explanations, and LaTeX code in Ukrainian and can adapt formulas to the style of Ukrainian publications.

In the printing industry, input data typically comes in various formats: text files, printed text, scans, handwritten text, and audio files. In such cases, it is recommended to use combined (multimodal) digitization technologies that combine the advantages of several technologies. The simultaneous use of different channels for inputting text information improves text accuracy; for example, combining OCR and ASR technologies.

The combined OCR and ASR method includes the following steps.

1. Parallel processing of input data using OCR and ASR.
2. Comparing recognition results and identifying discrepancies.
3. Analysis of discrepancies using a neural network module.
4. Selection of the most likely option based on contextual analysis.
5. Post-processing and correction using NLP (Natural Language Processing) tools.

Examples of several types of source texts for a single publication: a manuscript + an audio file + printed tables, or a scanned article + a translation + AI-generated missing sections. The process of digitizing such textual information for print

reproduction involves three main stages. The reading and recognition stage involves OCR technology (ABBYY FineReader, Tesseract, Google Drive OCR) from photos or scans of pages, as well as speech recognition (Google Docs Voice, OpenAI Whisper) via text dictation or audio recording followed by recognition. The second stage of post-processing and correction involves automatic punctuation correction (LanguageTool), contextual checking, and error correction. The result saving stage involves exporting to TXT, DOCX, EPUB, or PDF and integration with publishing systems.

Alternatives to keyboard typing not only speed up prepress preparation but also improve the accuracy and quality of printed materials. The choice of a specific technology also depends on the project's specifics and the qualifications of the staff.

Drawbacks and characteristics of text post-processing using AI models for printing purposes. For publishing and printing processes, it is crucial that AI does not add to or alter the text. To achieve this, rule-based prompting must be used, where clear constraints are imposed on the models, specifically prohibiting the addition of new words not present in the original, preserving sentence structure and word count, and prioritizing phonetic similarity when correcting errors. Even for the most advanced ASR systems, this approach significantly reduces the WER metric.

Many models use Generative Error Correction (GEC) technology, where an LLM can reconstruct text based on context. For example, GPT-5.5 and Claude can correct transcription errors by focusing on the acoustic or visual similarity of words, which is unacceptable for printing when high reproduction accuracy is required. In this case, when recognizing complex texts, the model can understand that a misrecognized word is phonetically close to the contextually correct term [11].

One of the biggest drawbacks of using modern models for text post-processing is the risk of degrading the quality of text that has already been correctly recognized – a phenomenon known as “overcorrection.” This is particularly noticeable in high-precision systems (such as Whisper Large), where the intervention of an LLM (e.g., GPT-5.5) can lead to changes in style or the removal of necessary repetitive text fragments [12]. Despite this, Whisper is currently the gold standard for accuracy in the Ukrainian language, with a WRR of over 96%.

GPT-5.5 demonstrates a high level of overall accuracy. The model is capable of processing text, images, and audio in real time, making it ideal for a combined method (OCR + ASR). However, it may “invent” text and be less effective in specific technical contexts.

Using Claude (Opus and Sonnet series), you can digitize large volumes of text data in a single pass without losing the original structure. The model delivers superior results in data structuring, parsing legal documents, and complex texts where accurate corrections are essential.

For text information in complexity groups 1 and 2, it is advisable to use fast and inexpensive models with basic confidence filtering.

For text information in complexity groups 3 and 4, it is necessary to use Claude 4.6 or GPT-5.5 with N-best hypotheses and complex prompts, which ensure higher digitization accuracy.

The use of N-best most likely recognition variants is a key element of modern multi-stage post-processing systems, as they provide the language model with a significantly broader context than a single hypothesis.

To minimize this risk, multi-stage pipeline technologies are proposed, which include: Uncertainty Estimation using N-best hypotheses.

N-best hypotheses help LLMs avoid errors through uncertainty estimation and constrained decoding. Uncertainty estimation involves the system analyzing the probability distribution across all options in the N-best list. If the base model (ASR or OCR) outputs several alternative options with approximately equally low scores, this indicates its uncertainty. The text is sent to the LLM for correction only when the confidence of the base system (OCR or ASR) falls below a certain threshold (e.g., $\beta=0.7$). When using N-best model hypotheses, the system is provided not with a single recognition option but with several alternative options, allowing the LLM to select the most logical one without going beyond the recognized characters.

Filtering allows the system to distinguish between “reliable” segments that do not require LLM intervention and “doubtful” ones where intervention is necessary. This approach helps avoid over-correction, where the LLM might corrupt text that has already been correctly recognized. The limited decoding of N-best hypotheses serves as the “foundation” for corrections, constraining the LLM’s generation space.

Special prompt rules force the LLM to select words exclusively from the N-best list. This prevents the model from using synonyms or adding unnecessary words, which is critical for preserving the accuracy of the original text. Often, the correct word is present in the N-best list but not in the top position. Using its linguistic knowledge, the LLM is capable of identifying this word as the more logical choice in the given context.

The LLM treats the N-best list as a set of building blocks. The model analyzes the differences between the options (for example, phonetically similar words) and selects the option that best fits the sentence structure and overall meaning. Since the LLM sees all the alternatives suggested by the recognizer, it can find the “middle ground” between grammatical correctness and acoustic/visual fidelity to the source text.

The use of N-best lists transforms the correction process into a form of model fusion. Research shows that combining multiple hypotheses achieves higher accuracy than any single model, since the probability that the correct word is contained in at least one of the hypotheses (the “OR” scenario) is significantly higher.

Thus, N-best hypotheses transform the LLM’s task from “guessing” to an intelligent selection among options that have been pre-filtered by the base recognition system [12].

It is also important that the model simultaneously “sees” both the page scan and the OCR output. This allows for the reconstruction of table structures – the model interprets the visual boundaries of cells. For search systems in publishing houses, the LLM can automatically add synonyms to terms, which improves subsequent work with archives by 10-15% according to the MRR (Mean Reciprocal Rank) metric. For publishing systems, it is important not only to recognize text but also to identify its

location on the page (bounding boxes). This is critical for checking errors in complex layouts [13-15].

In the publishing process, it is advisable to work with two different models in parallel (for example, GPT-5.5 and Claude 4.6) for complex passages, as they have low error correlation (each model makes mistakes in “its own” cases).

The highest efficiency in the publishing process will be achieved by a combined system that dynamically distributes tasks based on complexity: simple fragments to local OCR/ASR, complex ones through a pipeline with LLM correction.

Conclusions

Modern artificial intelligence technologies offer a wide range of possibilities for digitizing textual information in printing, from optical character recognition to experimental neural interfaces. The choice of the optimal digitization method depends on the type of input data, the volume, and the complexity level of the text. The developed mathematical model facilitates this selection. For text containing significant complexities, it is recommended to use a combined method that integrates, for example, OCR, ASR, and AI technologies, thereby increasing input speed and accuracy compared to manual text entry.

Promising areas of development in the printing industry for inputting text information of varying complexity levels include multimodal systems and their integration with generative AI models. The research results are useful for selecting technology and optimizing text digitization processes in publishing houses and printing companies, as well as in the educational process when preparing text information.

References.

1. Hrozna, O.O. (2024). Tekhnolohichni innovatsii v onlain-media: rol shtuchnoho intelektu ta virtualnoi realnosti u transformatsii kontentu [Technological innovations in online media: The role of artificial intelligence and virtual reality in content transformation]. *Obrii drukarstva*, 1(15), 102-112. [https://doi.org/10.20535/2522-1078.2024.1\(15\).302843](https://doi.org/10.20535/2522-1078.2024.1(15).302843).
2. MacHOUSE. (n. d.). Shtuchnyi intelekt u polihrafii: Nova era kreatyvnosti ta efektyvnosti [Artificial intelligence in printing: A new era of creativity and efficiency]. <https://marehouse.ua/shopblog/print-ai/>.
3. Hamad, K., & Kaya, M. (2016). A detailed analysis of optical character recognition technology. *IJAMEC*, 4 (Special Issue), 244-249. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/236939>.
4. Hrinkov, V., Hrinkova, G., & Hrinkov, S. (2024). Analysis of modern optical character recognition tools for character recognition and text from the image. *Communication, Informatization and Cybersecurity Systems and Technologies*, 6, 75-84. <https://doi.org/10.58254/viti.6.2024.05.75>.
5. Jones, K.S. (2001). Natural language processing: A historical review. University of Cambridge, Computer Laboratory. <https://www.cl.cam.ac.uk/archive/ksj21/histdw4.pdf>.
6. Evergreens. (n. d.). NLP-tekhnologii rozpiznavannia liudskoho movlennia [NLP technologies for human speech recognition]. <https://evergreens.com.ua/ua/articles/natural-language-processing.html>.
7. Kulchytska, Kh., Semeniv, M., & Mazo, M. (2024). Zastosuvannia systemy rozpiznavannia audiofailiv na osnovi shtuchnoho intelektu u polihrafii [Application of AI-based audio file

- recognition system in printing]. In *Artificial Intelligence in Science and Education (AISE 2024)*. (p. 135-138). <https://doi.org/10.35668/978-966-479-141-7>.
8. OpenAI. (2022). *Introducing Whisper*. <https://openai.com/research/whisper>.
 9. Morris, A.C., Maier, V., & Green, P. (2004). From WER and RIL to MER and WIL: Improved evaluation measures for connected speech recognition. *Proceedings of Interspeech 2004*, 2765-2768. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2004-668>.
 10. Levenshtein, V.I. (1966). Binary codes capable of correcting deletions, insertions and reversals. *Soviet Physics Doklady*, 6, 707-710.
 11. Naderi, M., Hermann, E., Nanchen, A., Hovsepyan, S., & Magimai.-Doss, M. (2024). Towards interfacing large language models with ASR systems using confidence measures and prompting. *Proceedings of Interspeech 2024*, 1-5 of Sept.
 12. Pu, J., Nguyen, T.-S., & Stüker, S. (2024). Multi-stage large language model correction for speech recognition (arXiv:2310.11532v2). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11532>.
 13. Randhawa, J. S. (2024). Claude vs GPT-4: Where it wins (and where it falls short). Dev.to. <https://dev.to/jasrandhawa/claude-vs-gpt-4-where-it-wins-and-where-it-falls-short-2b0n>.
 14. Anonymous. (2024). Battle of the wordsmiths: Comparing ChatGPT, GPT-4, Claude, and Bard. [Manuscript submitted for review]. ICLR 2025. <https://openreview.net/pdf?id=77e22bf753af7c89274afed5282ade1c6881d571>.
 15. MindStudio Team. (2026, March 18). ChatGPT vs Claude vs Gemini: Which AI platform is best for business in 2026? MindStudio. <https://www.mindstudio.ai/blog/chatgpt-vs-claude-vs-gemini-which-ai-platform-is-best-for-business-in-2026>.
 16. Ma, R., Qian, M., Gales, M., & Knill, K. (2024). ASR error correction using large language models. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.09554>.

ПРОАКТИВНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА АКТИВНОГО ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ВІД ПОЖЕЖ

Костарев Д.Б.

к.т.н. директор, ТОВ «Флексіс»
ORCID ID: 0009-0006-7528-031X

Тевяшев А.Д.

д.т.н., професор
ORCID ID: 0000-0001-5261-9874

Сізова Н.Д.

докт. фіз.-мат. наук, професор, кафедра КН та ІТ,
Харківський національний університет міського господарства імені Бекетова
ORCID ID: 0000-0002-0103-1939

Ткаченко В.П.

к.т.н., професор, кафедра «Медіасистем та технологій»,
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID ID: 0000-0002-5076-0724

***Анотація.** Обґрунтовано науково-технічну концепцію проактивного захисту від пожеж об'єктів, що поєднує раннє виявлення ознак займання, прогнозування розвитку небезпечної події, автоматизовану підтримку прийняття рішень і кероване активне пригнічення осередків вогню. Об'єкт представляє собою кіберфізичну систему, що безперервно вимірює стан зовнішнього середовища, аналізує відео- та тепловізійні дані, оцінює ризик, прогнозує можливий розвиток подій і завчасно готує захисний контур.*

***Ключові слова:** пожежна безпека, штучний інтелект, комп'ютерний зір, тепловізійне спостереження.*

Вступ

Природні пожежі, пожежі у зонах забудови та техногенні займання на об'єктах критичної інфраструктури дедалі частіше виникають як наслідок поєднання кліматичних, урбанізаційних, технологічних і воєнних чинників. Для України така проблема має особливий зміст, оскільки пожежні ризики посилюються ракетними ударами, атаками безпілотних апаратів, руйнуванням енергетичних і промислових об'єктів, пошкодженням транспортної інфраструктури та небезпекою повторних вибухів. У таких умовах пожежна безпека перестає бути лише інженерною характеристикою будівлі і перетворюється на задачу динамічного управління ризиком у реальному часі.

Традиційна логіка пожежогасіння передбачає, що система реагує після досягнення певного порогу: з'явився дим у приміщенні, спрацював датчик температури, оператор підтвердив подію або пожежні підрозділи отримали

повідомлення від очевидців. Такий підхід є недостатнім для природних пожеж, пожеж у гірській місцевості, пожеж на межі лісу та забудови, а також для воєнних сценаріїв, де час від первинного ураження до масштабного займання може вимірюватися хвилинами.

Наукова проблема полягає у переході від реактивної пожежної безпеки до проактивного управління, де система не лише фіксує факт займання, а й визначає передумови пожежі, прогнозує її розвиток, розраховує ризик для конкретного об'єкта, формує рекомендації для оператора, переводить виконавчі засоби у стан готовності та, за визначених умов, ініціює локальне пригнічення небезпеки. Така модель потребує поєднання комп'ютерного зору, тепловізійного контролю, геоінформаційного аналізу, сенсорних мереж, автономного живлення, захищених каналів зв'язку, математичного прогнозування та гідравлічного керування засобами гасіння.

Запропонована у монографії концепція базується на інтеграції двох взаємодоповнювальних рівнів. Перший рівень – Panoptes – виконує роль інтелектуального спостереження, розпізнавання та геоприв'язки небезпечних подій. Другий рівень – FireHalo – формує активний захисний контур об'єкта, здатний створювати водяні завіси, зволожувати критичні поверхні, подавати воду або пінний розчин у цільові зони, контролювати тиск, витрату, стан клапанів і резервуари. Разом ці рівні утворюють замкнений контур: виявлення – перевірка – геолокація – оцінювання ризику – сповіщення – активація – контроль результату.

Мета та задачі дослідження

Мета роботи є розробка і обґрунтування концепції управління пожежною безпекою.

Задачами роботи є:

- аналіз стану досліджень наукових підходів до питань проактивного захисту від пожеж;
- моделювання процесу переходу від реактивної пожежної безпеки до проактивного управління на основі штучного інтелекту;
- проектування архітектури інтелектуальної інформаційної системи пожежної безпеки з використанням Panoptes + FireHalo;
- розробка військово-кризового сценарію інтеграції з траєкторним спостереженням за безпілотними апаратами;
- створення математичних моделей, алгоритмів розпізнавання, злиття даних і прийняття рішень;
- дослідження питань кіберстійкості, автономності і надійності інформаційної системи пожежної безпеки;
- розробка методики впровадження та перевірки ефективності інтелектуальної системи.

Основна частина

Стан проблеми та світовий досвід

1. Багаторівневі системи Китаю як приклад масштабування.

Китайський досвід демонструє можливість побудови багаторівневої системи спостереження, де супутникові дані, безпілотні апарати, стаціонарні пости спостереження, професійні пожежні підрозділи, локальні пункти реагування та мобільні засоби гасіння зведені в єдину інформаційну платформу. Науково важливим у такому підході є не лише кількість сенсорів, а й скорочення часу між первинною ознакою небезпеки та прибуттям сил реагування. Якщо система здатна зменшити цей інтервал з десятків хвилин до кількох хвилин, площа потенційного поширення пожежі зменшується нелінійно, оскільки рання стадія займання характеризується значно меншими тепловими потоками та нижчою швидкістю розповсюдження фронту вогню.

У китайських провінціях застосовуються супутники з частим оновленням даних, безпілотні апарати з тепловізорами, стаціонарні оптико-тепловізійні пости, мобільні платформи з дронами для скидання вогнегасних зарядів, високонапірні установки, роботизовані наземні комплекси та локальні водні резервуари. Такий підхід є корисним як референс для проектування системи Panoptes + FireHalo, однак запропонована у цій роботі концепція відрізняється зміщенням акценту від загального регіонального моніторингу до активного захисту конкретного об'єкта, житлової групи, критичного вузла або промислової території (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика підходів до проблеми пожеже гасіння

Регіональний підхід	Сильна сторона	Типове обмеження	Висновок для Panoptes + FireHalo
Китай	Багаторівнева мережа спостереження, безпілотні апарати, локальні пости, швидке реагування	Висока складність і залежність від державної інфраструктури	Доцільно адаптувати принцип багаторівневості для об'єкта
США	Супутники, камери, диспетчерські центри, громадські карти	Переважно інформаційне сповіщення без локального активного контуру	Потрібен міст між виявленням і фізичним захистом
Європа	Геоінформаційне планування, координація служб, моделі ризику	Менша орієнтація на автономний захист окремого будинку	Потрібна сумісність з картами, планами евакуації та службами
Австралія	Досвід роботи у важких кліматичних умовах і на великих територіях	Складність підтримання зв'язку та живлення	Необхідна автономність і резервування
Україна та Близький Схід	Поєднання природних, техногенних і воєнних пожежних ризиків	Високі вимоги до живучості, кіберстійкості та швидкого реагування	Потрібна інтеграція траєкторного спостереження за безпілотними апаратами з пожежним захистом

2. США: супутниковий, камерний та громадський рівні.

У Сполучених Штатах Америки об'єднуються результати супутникового виявлення теплових аномалій, широких мереж камер спостереження, диспетчерських центрів і громадських карт небезпеки. Перевагою цього підходу є високе територіальне охоплення та інтеграція з центрами надзвичайного управління. Обмеженням є те, що більшість таких систем орієнтована на інформаційне виявлення та сповіщення, але не виконує автоматизоване активне пригнічення небезпеки безпосередньо на рівні об'єкта.

Для наукової моделі Panoptes + FireHalo цей досвід важливий як доказ того, що інформаційний рівень має поєднуватися з виконавчим. Інакше виникає розрив між знанням про небезпеку та фізичною дією. Саме цей розрив є основною причиною, чому раннє виявлення саме по собі не гарантує збереження об'єкта [1].

3. Європейський підхід: геоінформаційна координація та цивільний захист.

Європейська модель робить акцент на геоінформаційних платформах, картографуванні пожежної небезпеки, моделюванні поширення вогню, координації ресурсів і транскордонній взаємодії служб цивільного захисту. Така модель є системною, оскільки поєднує метеорологічні дані, карти рослинності, історичні пожежні події, супутникові знімки та диспетчерські процедури. Для запропонованої архітектури це означає необхідність створення не лише локальної системи гасіння, а й інформаційного шару, сумісного з картами ризику, цифровими планами об'єктів, маршрутами евакуації та планами взаємодії з рятувальними службами.

4. Австралія, Ізраїль та країни високого пожежного ризику.

Австралійський досвід показує, що системи раннього виявлення мають працювати в умовах великих відстаней, нестійкого зв'язку, високої температури, сильного вітру та складного рельєфу. Для цього застосовуються автономні камери, супутникові джерела, локальні мережі та алгоритми розпізнавання диму. Ізраїльський та близькосхідний контекст додає ще один вимір: пожежі можуть бути наслідком не лише природних чинників, а й бойових дій, падіння уламків, ударів безпілотних апаратів або ракетних атак. Це формує потребу у системах, які поєднують цивільний пожежозахист із кризовою безпекою об'єктів.

Українські наукові підходи і воєнний контекст

Проаналізовані матеріали щодо українських і світових інформаційних систем пожежної безпеки свідчать, що у 2020-2026 роках основними напрямками досліджень стали раннє виявлення пожеж, геоінформаційний аналіз, супутниковий моніторинг, сенсорні мережі, системи підтримки прийняття рішень, захист критичної інфраструктури та кібербезпека. Для України ці напрями мають не лише академічне, а й прикладне значення, оскільки пожежі часто виникають унаслідок бойових дій, руйнування промислових підприємств, атак на енергетичні об'єкти та пошкодження систем життєзабезпечення. Сьогодні сучасні інформаційні системи пожежної безпеки інтегрують штучний інтелект, геоінформаційні системи, інтернет речей, супутниковий моніторинг,

системи підтримки прийняття рішень, безпілотні технології та засоби кіберзахисту. Важливо, що така інтеграція відповідає не лише світовим тенденціям, а й потребам воєнного часу: автономності, резервуванню, стійкості до пошкоджень і здатності працювати за відсутності стабільного зв'язку.

Українські дослідження охоплюють інформаційні підсистеми попередження пожежної небезпеки для ситуаційних центрів, супутникове виявлення потенційно небезпечних пожеж на території України, застосування машинного навчання для аналізу знімків, системи підтримки прийняття рішень для моніторингу лісових пожеж, протипожежний захист об'єктів критичної інфраструктури та захист диспетчерських систем керування. Вони формують наукове підґрунтя для переходу від фрагментарних рішень до єдиної платформи проактивного управління пожежним ризиком [2]. Особливим внеском цієї монографії є поєднання українських досліджень із концепцією об'єктового активного захисту. Якщо більшість наукових систем фокусується на моніторингу, класифікації або підтримці рішень, то Panoptes + FireHalo пропонує замкнений контур: система не лише визначає ризик, а й фізично готує або активує захисні засоби [3]. Для воєнного контексту це особливо важливо, оскільки кожна хвилина між ударом, виникненням пожежі та початком гасіння суттєво впливає на масштаб руйнувань (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристика напряму українських досліджень

Напрямок українських досліджень	Наукове значення	Інтеграція у запропоновану концепцію
Підсистеми попередження пожежної небезпеки	Ймовірнісне оцінювання, температурні моделі, нейромережвий аналіз	Формування рівня небезпеки та порогів активації
Супутниковий моніторинг	Виявлення теплових аномалій, оцінка масштабів пошкоджень	Далекий рівень спостереження і зовнішня валідація подій
Геоінформаційні системи	Карти ризику, маршрути евакуації, прогнозування поширення	Картографічний шар FireHalo та взаємодія зі службами
Сенсорні мережі	Безперервний моніторинг температури, диму, газів і вологості	Локальні вузли периметра, фасадів, дахів і резервуарів
Безпілотні технології	Тепловізійна розвідка, огляд важкодоступних зон	Додаткова перевірка джерела та уточнення координат
Кіберзахист	Захист критичних систем, автентифікація, контроль доступу	Безпечне керування насосами, клапанами, сповіщеннями та журналами подій

Концепція проактивного захисту від пожеж

Проактивний захист від пожеж визначається як сукупність методів, засобів і алгоритмів, спрямованих на виявлення передумов пожежі, прогнозування її розвитку та підготовку або запуск захисних дій до моменту, коли займання досягне критичної зони об'єкта. У цьому сенсі система виконує не тільки функцію спостереження, а й функцію керування фізичним середовищем.

Основними принципами проактивного захисту від пожеж є: безперервність спостереження; багатоканальність даних; локальна обробка на сенсорному вузлі; оцінювання довіри до події; геоприв'язка джерела; урахування вітру, рельєфу та поточного або можливого горіння; зонне керування виконавчими пристроями; логування дій; підтвердження на ранніх етапах людиною і автоматизація лише для перевірених сценаріїв (табл. 3).

Принципово важливо, що така система не повинна бути “чорною скринькою”. Для пожежної безпеки необхідні прозорі рівні ризику, зрозумілі рекомендації, можливість ручного втручання, документальна фіксація причин активації та технічний контроль готовності. Тому запропонована модель містить п'ять станів: спостереження, попередження, підтверджена небезпека, підготовка захисного контуру, активний захист.

Таблиця 3 – Стан запропонованої системи

Стан системи	Умова переходу	Основна дія
Спостереження	Нормальний фон, відсутність стійких ознак диму або теплової аномалії	Періодичний аналіз відео, тепловізійних даних і сенсорів
Попередження	Поява підозрілої ознаки або слабкої теплової аномалії	Фіксація події, підвищення частоти аналізу, підготовка сповіщення
Підтверджена небезпека	Стійке підтвердження диму, полум'я, жару або зовнішнього ударного чинника	Геоприв'язка, оцінювання ризику, повідомлення власника або оператора
Підготовка захисного контуру	Небезпека наближається або прогнозована зона ураження перетинає захисний периметр	Перевірка тиску, резервуару, клапанів, живлення, режиму водяної завіси
Активний захист	Перевищено поріг ризику, підтверджено загрозу для об'єкта або увімкнено аварійний режим	Зонне зволоження, водяна завіса, цільове пригнічення, контроль результату

Архітектура Panoptes + FireHalo

1. Рівень спостереження Panoptes.

Рівень Panoptes виконує функцію інтелектуального спостереження за територією навколо об'єкта [4]. До його складу входять денні камери для аналізу контексту та видимих ознак диму або полум'я, тепловізійні канали для нічного спостереження і виявлення теплових аномалій, орієнтаційні датчики для визначення напрямку на джерело події, локальний обчислювальний модуль для виконання моделей розпізнавання без постійної залежності від хмарних сервісів, а також модуль документальної фіксації зображень, коротких відеофрагментів, рівнів довіри і технічних параметрів [5].

На відміну від звичайних камер спостереження, Panoptes розглядається як сенсорний вузол із просторовою орієнтацією. Тобто кожна виявлена подія має не лише клас (“дим”, “полум'я”, “теплова пляма”, “іскри”, “безпілотний апарат”), а

й напрямом, приблизну відстань, сектор невизначеності, часову динаміку та ймовірність розвитку небезпеки.

2. Рівень активного захисту FireHalo.

FireHalo є виконавчим рівнем, що перетворює інформаційне виявлення на фізичну дію. Система може включати периметральні колони, дахові або фасадні вузли, високонапірні форсунки, водяні завіси, насосний модуль, резервуар або підключення до басейну, датчики тиску і витрати, клапани зонного керування, резервне живлення та локальний контролер [6]. Призначення FireHalo полягає не лише у гасінні вже сформованого полум'я, а й у попередньому зволоженні критичних поверхонь, перехопленні іскор, зниженні впливу променистого теплового потоку та створенні захисного бар'єра.

FireHalo – це зовнішній інтелектуальний контур захисту, який розміщується навколо будинку, поєднує архітектурне виконання, тепловізійне спостереження, камери, форсунки високого тиску, підключення до водного резервуару та автономне виявлення небезпеки. Ця ідея є важливою, оскільки дозволяє інтегрувати пожежну безпеку не як додатковий аварійний пристрій, а як елемент архітектури об'єкта.

3. Шестирівнева функціональна модель.

Узагальнена архітектура Panoptes + FireHalo може бути подана як шестирівнева функціональна модель: рівень оптико-тепловізійного спостереження; рівень локального аналізу та фільтрації хибних спрацювань; рівень геолокації та оцінювання ризику; рівень мобільного і диспетчерського сповіщення; рівень активного керування насосами, клапанами і форсунками; рівень конструктивної інтеграції у будівельні модулі, фасади, дахи або периметр (табл. 4).

Таблиця 4 – Характеристика шестирівневої функціональної моделі

Рівень	Функція	Основні дані	Результат
Спостереження	Відео- та тепловізійний контроль	Кадри, теплові карти, орієнтація камери	Первинні ознаки події
Локальний аналіз	Розпізнавання диму, полум'я, тепла, іскор, безпілотних апаратів	Ознаки зображення, часові послідовності	Клас події та рівень довіри
Геолокація	Оцінювання напрямку, координат і зони невизначеності	Азимут, кут місця, карта, рельєф, другий сенсор	Позначка на карті та сектор ризику
Оцінювання ризику	Урахування відстані, вітру, горючого навантаження, критичності об'єкта	Дані середовища та стан системи	Рівень небезпеки і рекомендація
Керування захистом	Підготовка або запуск зон FireHalo	Тиск, витрата, клапани, резервуар, живлення	Зволоження, водяна завіса, цільове пригнічення
Документування	Ведення журналу подій, звітність, післяподійний аналіз	Відео, події, дії оператора, телеметрія	Доказова база, технічний аудит, навчальні дані

Воєнно-кризовий сценарій інтеграції з траєкторним спостереженням за безпілотними апаратами

Найбільш інноваційним продовженням концепції є інтеграція цивільного захисту від пожеж з воєнно-кризовим рівнем Raportes, який здатний виявляти безпілотні літальні апарати, супроводжувати їхні траєкторії та прогнозувати зони потенційного падіння, влучання або руйнування. У країнах, де тривають бойові дії, частина таких апаратів може не бути знешкоджена. Вони можуть досягати цілі або падати після втрати управління, спричиняючи пожежі на енергетичних об'єктах, складах, промислових майданчиках, житлових кварталах, лісових масивах або транспортній інфраструктурі.

З погляду цивільного захисту ключовим є не питання впливу на апарат, а питання готовності пожежної системи до вторинного наслідку. Якщо система бачить траєкторію безпілотного апарата, вона може визначити ймовірний сектор ризику і заздалегідь підготувати пожежні ресурси: перевести насосні модулі у режим очікування, перевірити тиск, підготувати водяні завіси, попередити диспетчерів, надіслати сигнал мобільним групам, активувати відеоспостереження за критичними зонами та побудувати прогноз маршруту реагування [7-9].

Така модель створює новий клас систем: не просто раннє виявлення пожежі, а попереджувальне протипожежне управління до факту займання. Вона особливо актуальна для України, країн Близького Сходу, прикордонних територій, енергетичних об'єктів, нафтобаз, логістичних вузлів, портів, аеропортів, центрів управління, лікарень і житлових комплексів у зонах підвищеної воєнної загрози (табл. 5).

Таблиця 5 – Етапи функціонування системи

Режим	Передумова	Дія системи	Мета
Спокій	Загроз не виявлено	Планове спостереження і самодіагностика	Підтримання готовності
Повітряна тривога об'єктового рівня	Виявлено небезпечний апарат у віддаленому секторі	Підвищення частоти аналізу, підготовка карти ризику	Скорочення часу переходу до реагування
Прогнозована зона ураження	Траєкторія перетинає сектор поблизу об'єкта	Перевірка насосів, клапанів, води, зв'язку, резервного живлення	Технічна готовність до пожежі
Очікуване ураження	Висока ймовірність падіння або влучання в небезпечну зону	Сповіднення диспетчера, пожежних служб, власників, мобільних груп	Підготовка людей і ресурсів
Післяподійний контроль	Зафіксовано удар, теплову аномалію, дим або полум'я	Активація локальної зони, відеопідтвердження, контроль результату	Локалізація пожежі на ранній стадії

Сценарій функціонування складається з таких етапів: виявлення повітряної загрози; побудова та оновлення траєкторії; прогноз імовірної зони влучання або

падіння; перетин цієї зони з картою критичних об'єктів і пожежонебезпечних матеріалів; розрахунок очікуваного пожежного ризику; сповіщення пожежної служби та власників об'єктів; переведення FireHalo у режим попередньої готовності; після події – автоматичне виявлення диму, тепла або полум'я і запуск відповідних зон захисту (рис. 1).

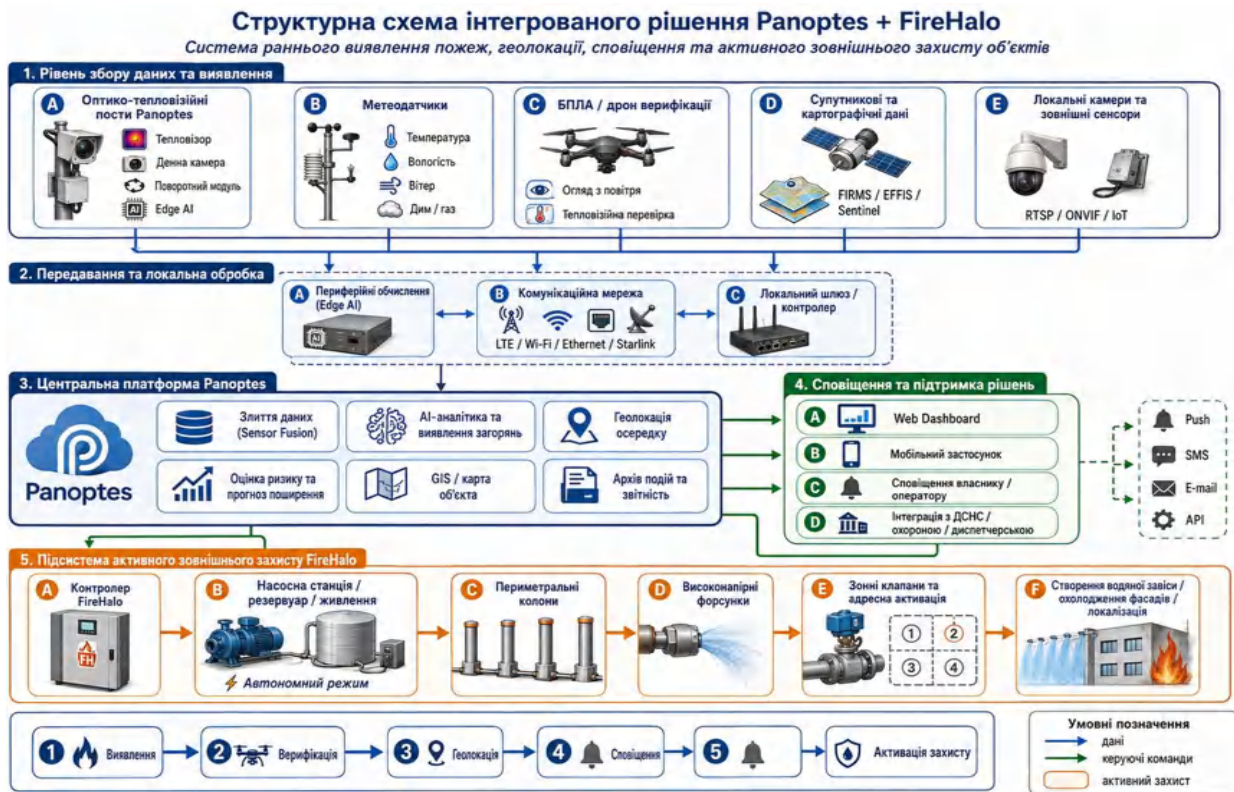


Рисунок 1– Структурна схема інтегрованого рішення

Математичні моделі

1. Узагальнена модель пожежного ризику.

Пожежний ризик для об'єкта доцільно розглядати як функцію ймовірності виникнення джерела займання, ймовірності його поширення до об'єкта, потенційних збитків і готовності системи захисту [10, 11]. У спрощеному вигляді інтегральний ризик можна записати так:

$$R(t) = P_i(t) \cdot P_s(t) \cdot L(t) \cdot [1 - G(t)], \quad (1)$$

де $R(t)$ – поточний ризик;

$P_i(t)$ – ймовірність виникнення займання;

$P_s(t)$ – ймовірність поширення вогню до критичної зони;

$L(t)$ – очікуваний рівень збитку;

$G(t)$ – готовність системи захисту.

Зростання готовності системи, наприклад за рахунок попереднього запуску насосів або підготовки водної завіси, зменшує ефективний ризик навіть до факту прямого контакту вогню з об'єктом.

2. Байєсівське оновлення довіри до події.

Оскільки ознаки диму, полум'я та теплових аномалій можуть мати хибні джерела, система повинна постійно оновлювати довіру до події на основі нових спостережень. Для цього застосовується байєсівська схема:

$$P(F | z_1, \dots, z_n) = \frac{P(z_n | F) \cdot P(F | z_1, \dots, z_{n-1})}{P(z_n)}, \quad (2)$$

де F – подія пожежі або небезпечного теплового процесу;

z_n – нове спостереження: кадр, тепла карта, показник сенсора, напрямок вітру, підтвердження з безпілотного апарата або зовнішнє повідомлення.

Така формалізація дозволяє не запускати систему гасіння за одиничним шумовим сигналом, але швидко підвищувати рівень небезпеки за стійких і взаємно узгоджених ознак.

3. Геолокація джерела займання.

Для одного стаціонарного сенсорного вузла координати джерела можуть бути оцінені як промінь або сектор невизначеності. Якщо координати вузла дорівнюють (x_0, y_0) , а азимут на подію – α , то множина можливих положень має вигляд:

$$x = x_0 + \rho \cos \alpha, \quad y = y_0 + \rho \sin \alpha, \quad \rho \in [\rho_{\min}, \rho_{\max}]. \quad (3)$$

За наявності двох вузлів або вузла і безпілотного апарата виконується перетин двох напрямків. З урахуванням похибок формується не точка, а еліпс довіри, площа якого зменшується зі зростанням кількості незалежних спостережень.

$$\Sigma_p = (H^T \cdot R_z^{-1} \cdot H)^{-1}, \quad (4)$$

де Σ_p – коваріаційна матриця похибки координат;

H – матриця геометрії спостереження;

R_z – матриця шумів вимірювання.

Менше значення визначника Σ_p означає точнішу локалізацію і, відповідно, більш економну активацію зон FireHalo.

4. Прогноз траєкторії безпілотного апарата для пожежної готовності.

У воєнно-кризовому сценарії стан повітряного об'єкта можна подати вектором:

$$x_k = [p_x, p_y, p_z, v_x, v_y, v_z]^T, \quad (5)$$

де p_x, p_y, p_z – просторові координати;

v_x, v_y, v_z – складові швидкості.

Прогноз на короткому горизонті виконується за дискретною моделлю руху:

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k, \quad (6)$$

де A – матриця переходу стану;

w_k – випадкове збурення, що враховує маневр, вітер, втрату керування або похибки спостереження.

Для цивільного захисту від пожеж результатом є не траєкторія ураження, а імовірна зона подальшого падіння або влучання:

$$Z_{impact} = \{p : (p - \hat{p})^T \Sigma_p^{-1} (p - \hat{p}) \leq \chi_\beta^2\}, \quad (7)$$

де \hat{p} – прогнозований центр зони;

Σ_p – невизначеність прогнозу;

χ_β^2 – поріг довіри.

Якщо ця зона перетинає пожежонебезпечний об'єкт, система підвищує рівень готовності пожежного контуру.

5. Модель поширення фронту вогню.

Для прикладного прогнозування поширення вогню можна використовувати спрощену модель швидкості фронту, що залежить від типу горючого матеріалу, вологості, нахилу місцевості та вітру:

$$v_f = v_0 \cdot K_w(W, \theta_w) \cdot K_s(\varphi) \cdot K_m(M), \quad (8)$$

де v_f – швидкість фронту;

v_0 – базова швидкість для конкретного горючого матеріалу;

K_w – коефіцієнт впливу вітру;

K_s – коефіцієнт нахилу;

K_m – коефіцієнт вологості. Час досягнення критичної межі об'єкта можна оцінити як:

$$T_{arr} = \frac{d}{v_f}, \quad (9)$$

де d – відстань від осередку до захисної межі.

Якщо T_{arr} менший за суму часу підготовки системи і часу створення ефективної водяної завіси, система повинна переходити у режим попередньої активації.

6. Гідравлічна модель FireHalo.

Для зонного пожежогасіння необхідно забезпечити достатню витрату води або розчину в кожній активній зоні. Сумарна витрата дорівнює:

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n q_i u_i, \quad (10)$$

де q_i – витрата i -ї форсунки або зони;
 $u_i \in \{0,1\}$ – стан активації зони. Мінімальний об'єм резервуару для часу роботи τ визначається як:

$$V_{\min} = Q_{total} \cdot \tau \cdot k_r, \quad (11)$$

де k_r – коефіцієнт резерву, що враховує втрати, нерівномірність тиску, повторну активацію і технічний запас.

Тиск у вузлі повинен задовольняти умову:

$$P_i \geq P_{req} + \Delta P_{pipe} + \Delta P_{height}, \quad (12)$$

де P_{req} – мінімальний робочий тиск форсунки;

ΔP_{pipe} – втрати у трубопроводах;

ΔP_{height} – втрати на підйом води.

Ці співвідношення є основою для розрахунку насосної групи, діаметра труб, кількості зон і часу автономної роботи.

7. Оптимізація розміщення сенсорів і форсунок.

Оптимізація розміщення вузлів Panoptes і FireHalo може бути сформульована як задача максимізації покриття за обмежень бюджету, видимості, гідравліки та надійності:

$$\max \sum_{a \in A} w_a C_a(S), \text{ за умов } \sum_{s \in S} c_s \leq B, \quad (13)$$

де A – множина ділянок території;

w_a – вага небезпеки ділянки;

$C_a(S)$ – функція покриття ділянки набором сенсорів і виконавчих вузлів S ;

c_s – вартість вузла;

B – бюджет.

У воєнному сценарії ваги w_a повинні враховувати не лише природну пожежну небезпеку, а й імовірність ударів, критичність об'єкта, наявність легкозаймистих матеріалів і складність доступу пожежних підрозділів.

Алгоритми розпізнавання, злиття даних і прийняття рішень

Алгоритмічне ядро системи складається з кількох взаємопов'язаних задач: виявлення ознак небезпеки у видимому та тепловому діапазонах; відокремлення реальних подій від хибних спрацювань; оцінювання просторового положення джерела; прогнозування розвитку; визначення рівня ризику; вибір режиму реагування; контроль результату після активації.

Для аналізу зображень доцільно застосовувати згорткові нейронні мережі та моделі часової стабільності ознак. Дим відрізняється від хмар або туману не лише формою, а й динамікою: він має локальне джерело, спрямований рух під

впливом вітру, поступове розширення та специфічну текстуру. Полум'я має виражену просторово-часову мінливість, а теплова аномалія – підвищену температуру відносно локального фону. Тому класифікація повинна враховувати не один кадр, а коротку послідовність спостережень.

Злиття даних повинно об'єднувати відео, тепловізійні кадри, метеорологічні параметри, стан водного резервуару, тиск, витрату, карту місцевості, інформацію про горючі матеріали, траєкторії повітряних загроз і повідомлення зовнішніх служб. Результатом є не просто “тривога”, а структурований об'єкт події: тип, координати, сектор невизначеності, рівень довіри, рівень ризику, рекомендована дія, потрібний ресурс і очікуваний час до критичної межі (табл. 6).

Таблиця 6 – Злиття даних

Джерело даних	Тип ознак	Наукове використання	Рішення системи
Денна камера	Дим, полум'я, контекст місцевості	Виявлення та класифікація зображень	Підозра або підтвердження події
Тепловізор	Теплові плями, жар, нічні ознаки	Оцінювання температурного контрасту	Підтвердження небезпеки у темний час
Сенсори середовища	Вітер, вологість, температура, тиск	Прогноз поширення і готовності системи	Корекція рівня ризику
Карта та рельєф	Схили, будівлі, рослинність, шляхи доступу	Моделювання напрямку поширення	Пріоритет зон FireHalo
Траєкторії повітряних загроз	Напрямок, швидкість, зона невизначеності	Прогноз імовірної зони падіння	Попередня готовність пожежного контуру
Телеметрія FireHalo	Тиск, витрата, клапани, вода, живлення	Контроль виконання дії	Підтвердження ефективної активації

Система підтримки прийняття рішень має працювати за принципом поступового нарощування реакції. Низькі рівні ризику призводять до фіксації події і сповіщення; середні – до рекомендації оператору та підготовки виконавчих вузлів; високі – до активації попередньо визначених сценаріїв, якщо це дозволено правилами експлуатації. Такий підхід мінімізує ризик хибного запуску і водночас зберігає можливість швидкого реагування.

Кіберстійкість, автономність і надійність

Оскільки Panoptes + FireHalo керує не лише інформаційними повідомленнями, а й фізичними виконавчими пристроями, питання кіберстійкості є критичним. Несанкціоноване ввімкнення або вимкнення насосів, підроблення телеметричних даних, блокування сповіщень або втручання в диспетчерські системи можуть створити загрозу для людей і об'єктів. Тому система має проектуватися за принципами мінімальних прав доступу, багатофакторної автентифікації, криптографічного захисту каналів,

документування команд, розмежування ручного та автоматичного керування, а також локальної працездатності за втрати зовнішнього зв'язку [12].

Важливість захисту критичної інфраструктури, диспетчерських систем керування, систем виявлення вторгнень, архітектури нульової довіри та стійкості до кібератак є критично важливою для функціонування всієї системи. Для Panoptes + FireHalo це означає, що пожежний контур не повинен залежати від одного каналу зв'язку, одного джерела живлення або одного обчислювального вузла. Важливо забезпечити острівний режим роботи: локальне виявлення, локальне ухвалення аварійного рішення, резервне живлення, автономний резервуар і механічно безпечні стани клапанів.

Надійність системи оцінюється не тільки точністю розпізнавання, а й готовністю до виконання фізичної дії. Можна ввести показник функціональної готовності:

$$G(t) = g_w(t) \cdot g_p(t) \cdot g_e(t) \cdot g_c(t) \cdot g_v(t), \quad (14)$$

де g_w – готовність водного ресурсу;

g_p – готовність насоса;

g_e – готовність живлення;

g_c – готовність зв'язку або локального керування;

g_v – готовність клапанів і форсунок.

Якщо хоча б один множник наближається до нуля, загальна готовність системи різко зменшується, що має бути відображено в мобільному застосунку та диспетчерському інтерфейсі.

Методика впровадження та перевірки ефективності

Впровадження системи доцільно виконувати поетапно. Перший етап – інженерне обстеження об'єкта: рельєф, рослинність, напрямки переважаючих вітрів, джерела води, точки живлення, місця встановлення сенсорних вузлів, критичні фасади, дахові зони, евакуаційні маршрути і можливі зовнішні загрози. Другий етап – моделювання покриття та ризиків. Третій – встановлення мінімальної конфігурації: один або кілька вузлів Panoptes, базова карта об'єкта, мобільне сповіщення, насосний модуль, декілька зон FireHalo. Четвертий – польове випробування з контрольованими джерелами диму, тепловими макетами, перевіркою тиску, витрати і часу реакції [13-15].

Для воєнно-кризових об'єктів потрібно додати окремий етап інтеграції з інформацією про повітряні загрози, але виключно в межах цивільного захисту. Перевіряється здатність системи отримувати або формувати прогноз зони ризику, підвищувати готовність пожежного контуру, повідомляти відповідальні служби та документувати подію (табл. 7).

Експериментальна перевірка повинна включати не лише показники розпізнавання, а й повний цикл: виявлення, повідомлення, підтвердження,

активація, контроль тиску, контроль фактичного зволоження, збереження журналу, відновлення системи після спрацювання. Саме повний цикл є головним доказом практичної цінності концепції [16, 17].

Таблиця 7 – Етапи інтеграції

Показник	Позначення	Метод оцінювання	Цільове значення для пілота
Час первинного виявлення	T_det	Інтервал від появи ознаки до події в системі	Мінімальний, бажано до хвилинного масштабу
Час підтвердження	T_conf	Інтервал до стійкої класифікації події	Залежить від рівня хибних спрацювань
Час готовності FireHalo	T_ready	Інтервал від команди до робочого тиску	Менший за прогнозований час підходу небезпеки
Точність геолокації	E_geo	Відстань між оцінкою і фактичним джерелом	Достатня для вибору правильної зони
Частка хибних тривог	FPR	Кількість хибних подій на одиницю часу	Допустима для експлуатації без втоми оператора
Готовність системи	G	Комбінований показник води, живлення, зв'язку, насосів і клапанів	Висока у пожежонебезпечний період
Ефективність пригнічення	η_{sup}	Зменшення теплового потоку або площі займання	Підтверджується польовими тестами

Результати досліджень

Наукова новизна, практична цінність і обмеження

Наукова новизна запропонованої концепції полягає у формуванні інтегрованої кіберфізичної моделі об'єктового захисту від пожеж, де раннє виявлення, геолокація, прогнозування ризику, траєкторне спостереження за зовнішніми військовими загрозами, підготовка виконавчих засобів і активне пригнічення об'єднані в єдину систему проактивного управління. У більшості наявних рішень ці функції розділені: одні системи лише виявляють, інші лише сповіщають, треті лише зволожують об'єкт вручну або за зовнішнім сигналом. Raportes + FireHalo поєднує інформаційну та фізичну реакцію.

Практична цінність полягає у можливості застосування для приватних будинків у пожежонебезпечних регіонах, житлових комплексів, ранчо, виноробних господарств, складів, енергетичних об'єктів, промислових майданчиків, об'єктів критичної інфраструктури і територій, що зазнають воєнних атак. Для України система може бути особливо корисною у захисті об'єктів, де пожежа після удару або падіння уламків здатна спричинити вторинні катастрофічні наслідки.

Обмеження концепції пов'язані з необхідністю польової перевірки моделей виявлення у різних погодних умовах, сертифікації гідравлічних і електричних вузлів, дотримання вимог пожежних норм, захисту персональних даних при відеоспостереженні, мінімізації хибних спрацювань, гарантування кіберстійкості та розроблення чітких правил автоматичної активації.

Автоматичний режим має впроваджуватися лише після достатньої статистичної валідації та погодження з відповідними нормативними вимогами.

Висновки

У монографії показано, що сучасний розвиток пожежної безпеки переходить від пасивного захисту і реактивного реагування до проактивних інтелектуальних систем, здатних виявляти ознаки небезпеки, оцінювати ризик, прогнозувати розвиток подій і керувати фізичними засобами захисту. Світовий досвід Китаю, Сполучених Штатів Америки, Європи, Австралії та країн із високими воєнними ризиками підтверджує важливість багаторівневих систем спостереження, але також демонструє потребу в локальному активному контурі захисту конкретного об'єкта.

Українські наукові матеріали засвідчують високий рівень актуальності інформаційних систем пожежної безпеки в умовах воєнних загроз. Найважливішими напрямками є штучний інтелект, геоінформаційні системи, сенсорні мережі, супутниковий моніторинг, безпілотні технології, системи підтримки прийняття рішень, кіберзахист і захист критичної інфраструктури. Запропонована концепція Panoptes + FireHalo розвиває ці напрями, додаючи до них активне керування пожежозахисним контуром.

Ключовим новим елементом є воєнно-кризовий сценарій, у якому система Panoptes, що виявляє та супроводжує повітряні загрози, використовується для пожежної готовності: прогнозування імовірної зони падіння або влучання безпілотного апарата, попередження пожежних служб, підготовка FireHalo, підвищення готовності води, насосів, клапанів і локальних команд реагування. Такий підхід формує нову категорію цивільних систем: попереджувальне протипожежне управління до виникнення пожежі.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на польову перевірку моделей розпізнавання диму, полум'я, теплових аномалій та іскор; оцінювання ефективності водяних завіс; розроблення цифрового двійника об'єкта; оптимізацію розміщення вузлів; створення наборів даних для умов воєнних пожеж; сертифікацію гідравлічних модулів; побудову захищеної архітектури керування і розроблення методики взаємодії з підрозділами цивільного захисту.

Список літератури.

1. Barmproutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing. *Sensors*, 20(22), 6442. <https://doi.org/10.3390/s20226442>.

2. Орещенко, А.В., Осадчий, В.І., Савенець, М.В., & Балабух, В.О. (2020). Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування, (11), 33-44. *Вісник Національної академії наук України*. <https://doi.org/10.15407/visn2020.11.033>.

3. Писарчук, О.О., & Кошара, А.В. (2024). Аналіз індикаторів загроз інформаційній безпеці в інформаційно-телекомунікаційних системах за результатами застосування SIEM-

систем. Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, 1(07), 79-84. <https://doi.org/10.36994/2788-5518-2024-01-07-11>.

4. Головіна, Н.В. (2024). Розроблення системи підтримки прийняття рішень для моніторингу та попередження лісових пожеж в Україні. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2(89), 150-156. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.21>.

5. Пожарко, А.Р. (2024) Інформаційна система пожежної безпеки зон відпочинку на базі технології ІоТ. <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/15812>.

6 Сіденко, Д.І. (2025) Інтелектуальна комп'ютерна система підтримки прийняття рішень при пожежній небезпеці. <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/b65e5eca-09b5-4e68-b61b-8f225ff59722>.

7. Tevyashev, A., Shostko, I., Neofitnyi, M., & Koliadin, A. (2019) Laser Opto-Electronic Airspace Monitoring System in the Visible and Infrared Ranges. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). (p. 170-173). <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943887>.

8. Tevyashev, A., Zemlyaniy, O., Shostko, I., Kostaryev, D., & Paramonov, A. (2024) Devising an analytical method for estimating aircraft positioning accuracy by an infocommunication network of optoelectronic stations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(9(131)), 36-48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312762>.

9. Tevyashev, A., Haluza, O., Kostaryev, D., Paramonov, A., & Sizova, N. (2025) Devising a numerical method for estimating the positioning accuracy of aircraft by an information-communication network of optoelectronic stations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(9(135)), 101-120. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.330922>.

10. Shostko, I., Tevyashev, A., Kulia, Y., & Koliadin, A. (2020). Optical-Electronic System of Automatic Detection and High-Precise Tracking of Aerial Objects in Real-Time. The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, CMIS. (p. 784-803). <https://doi.org/10.32782/cmisis/2608-59>.

11. Shostko, I., Tevyashev, A., Zemlyaniy, O., & Tsibulnikov, D. (2023) Designing and testing a prototype of optical-electronic station for detecting and tracking moving objects in the air. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5(126)), 36-42. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.295101>.

12. Гнатушенко, В.В., Удовик, І.М., Хайпке, К., & Гнатушенко, М.В. (2026) Застосування методів машинного навчання для аналізу впливу лісових пожеж на знімки Sentinel-2 по Україні. Системні технології, 1(162), 27-35. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-162-2026-03>.

13. Carta, F., Zidda, C., Putzu, M., Loru, D., Anedda, M., & Giusto, D. (2023) Advancements in Forest Fire Prevention: A Comprehensive Survey. Sensors, 23(14), 6635. <https://doi.org/10.3390/s23146635>.

14. Granda, B., León, J., Vitoriano, B., & Hearne, J. (2023). Decision Support Models and Methodologies for Fire Suppression. Fire, 6(2), 37. <https://doi.org/10.3390/fire6020037>.

15. Huot, F., Hu, R.L., Goyal, N., Sankar, T., Ihme, M., & Chen, Y.-F. (2023). Next Day Wildfire Spread: A Machine Learning Dataset to Predict Wildfire Spreading from Remote-Sensing Data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 60. (p. 1-13). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2022.3192974>.

16. Lelis, C.A.S., Roncal, J.J.; Silveira, L., et al. (2026) Drone-Based AI System for Wildfire Monitoring and Risk Prediction. IEEE Access. Vol. 12. (p. 139865-139882). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3462436>.

17. Maranghides, A., Link, E., Nazare, S., Hawks, S., McDougald, J., Quarles, S., & Gorham, D. (2025). WUI Structure/Parcel/Community Fire Hazard Mitigation Methodology. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2205>.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ

Бобарчук О.А.

Завідувач кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій, к.т.н., доцент,
Національний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID ID: 0000-0003-3176-7231

Злотківська Т.В.

магістр, кафедра мультимедійних систем і технологій
Харківського національного економічного університету ім. С. Кузнеця
ORCID ID: 0009-0009-0661-8956

***Анотація.** У роботі досліджено теоретико-методологічні засади застосування нейромережових методів для реконструкції та відновлення зображень. Систематизовано типи деградацій візуальних даних, висвітлено особливості автоматичного виділення ознак і семантичного аналізу сцен у системах зі штучним інтелектом. Практична частина дослідження демонструє високу ефективність спеціалізованих сервісів у задачах реставрації архівних фотографій, колоризації, HDR-реконструкції та інтелектуального масштабування контенту.*

***Ключові слова:** штучний інтелект, нейронні мережі, генеративні моделі, реконструкція та відновлення зображень, колоризація.*

Вступ

У сучасному цифровому суспільстві візуальна інформація є основним каналом комунікації, передачі даних та документування подій. Однак процеси отримання, зберігання та передачі цифрового контенту супроводжуються появою різноманітних деградацій: від електронних шумів сенсорів та оптичного розмиття до артефактів стиснення та втрати роздільної здатності. Актуальність дослідження обумовлена критичною необхідністю відновлення чистоти та чіткості зображень у таких сферах, як медична візуалізація, супутникова зйомка, системи безпеки та цифрова реставрація культурної спадщини. Класичні алгоритми обробки не здатні ефективно вирішувати завдання реконструкції без втрати деталізації. Впровадження нейромережових методів, здатних до інтелектуального відновлення втраченої інформації на основі контексту, стає пріоритетним напрямом розвитку комп'ютерних мультимедійних технологій.

Розвиток систем штучного інтелекту (надалі – ШІ) ознаменував перехід від евристичних процедур до глибокого навчання. Ознаки зображень, наприклад, контури, текстури, форми, формуються автоматично в процесі навчання моделі. Сучасний етап характеризується домінуванням генеративних моделей. Системи не просто фільтрують дані, а здатні генерувати високочастотні деталі, що виглядають природно та реалістично, фактично «домислюючи» відсутні

елементи. Використання потужних графічних процесорів та навчання на великих наборах даних дозволило створити інструменти, які виконують семантичний аналіз сцени, враховують контекст об'єктів та прогнозують відсутню інформацію з високою точністю.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка ефективності нейромережевих методів у процесах реконструкції, відновлення та покращення якості цифрових зображень.

Для досягнення поставленої мети визначено завдання:

- сформулювати понятійно-категоріальний апарат та розмежувати терміни «реконструкція», «відновлення» та «покращення» зображень;
- систематизувати типи пошкоджень та спотворень цифрового контенту;
- дослідити методологічні особливості застосування нейронних мереж;
- провести експериментальну перевірку сервісів та моделей генеративного ШІ;
- здійснити порівняльний аналіз отриманих результатів та визначити перспективи розвитку технологій у мультимедіа.

Структура дослідження включає вступ, два основні розділи, висновок та список використаних джерел. Перший розділ присвячено теоретичним засадам обробки та класифікації спотворень. У другому розділі розглянуто методологію застосування ШІ для вирішення конкретних задач: від шумозаглушення до колоризації висновки та перспективи щодо практичного значення роботи.

1 Теоретичні засади нейромережевої обробки та реконструкції зображень

Автори сформулювали визначення поняття реконструкція зображень як процес формування, відтворення або покращення цифрового зображення на основі неповних, пошкоджених, зашумлених або непрямих даних із застосуванням математичних, алгоритмічних та інтелектуальних методів обробки.

Реконструкція передбачає відновлення структури, геометрії, деталей, текстур або візуальної цілісності зображення, які були втрачені або недоступні під час отримання, передачі чи зберігання даних. У системах цифрової обробки реконструкція реалізується за допомогою класичних алгоритмів комп'ютерного бачення, методів оптимізації, статистичних моделей, а також нейронних мереж і генеративних моделей штучного інтелекту.

До завдань реконструкції належать:

- відновлення відсутніх фрагментів зображення;
- підвищення роздільної здатності;
- реконструкція тривимірних сцен із двовимірних зображень;
- відтворення деталей після стиснення або втрати даних;
- формування HDR-зображень;
- реконструкція медичних, супутникових та наукових зображень із непрямих вимірювань.

Загалом, реконструкція зображення означає побудову зображення в цільовій області на основі сигналів з вихідної області, що можна розділити на завдання перетворення необроблених даних у зображення та завдання постобробки. У першому випадку зображення будується на основі необроблених даних, зібраних датчиками, тоді як у другому – на основі ознак, витягнутих із зображень вихідної області. Для виконання завдань реконструкції використовуються моделі GAN, такі як Cycle GAN [1].

Відновлення зображень – це процес усунення дефектів, спотворень або деградацій цифрового зображення з метою повернення до стану, максимально наближеного до початкової якості. Метою відновлення є компенсація негативного впливу шумів, розмиття, артефактів стиснення, втрати різкості або інших факторів, що виникають під час отримання, передавання, зберігання чи обробки зображень.

До типових методів відновлення належать:

- денойзинг (видалення шуму);
- деблюринг (усунення розмиття);
- корекція контрасту та освітлення;
- усунення JPEG-артефактів;
- колоризація чорно-білих зображень;
- реставрація старих фотографій;
- відновлення пошкоджених або частково зруйнованих зображень.

Сучасні системи активно використовують згорткові нейронні мережі, генеративно-змагальні мережі, трансформерні архітектури та дифузійні моделі для автоматизації процесу покращення якості з високим рівнем деталізації.

Відновлення покращує зображення в певному заздалегідь визначеному сенсі. Воно є об'єктивним процесом. Відновлення полягає у спробі реконструювати зображення, яке зазнало погіршення якості, з використанням попередніх знань про явища погіршення якості. Ці техніки спрямовані на моделювання погіршення якості, а потім застосування оберненого процесу з метою відновлення вихідного зображення. Техніки відновлення базуються на математичних або ймовірнісних моделях обробки зображень. Натомість покращення базується на суб'єктивних людських уподобаннях щодо того, що саме становить «хороший» результат покращення [2].

Відновлення зображення відноситься до класу методів, які мають на меті усунути або зменшити погіршення якості, що відбулися під час отримання цифрового зображення [2].

Відмінності між поліпшенням якості зображення та відновленням зображення.

1. Методи покращення якості зображення – це евристичні процедури, призначені для обробки зображення з метою використання психофізичних особливостей людської системи. Натомість методи відновлення зображення – це, в основному, методи реконструкції, за допомогою яких пошкоджене зображення відтворюється з використанням попередніх знань про явища пошкодження [2].

2. Покращення якості зображення можна реалізувати за допомогою методів просторової та частотної області, тоді як відновлення зображення – за допомогою методів частотної області та алгебраїчних методів [2].

3. Обчислювальна складність покращення зображення є відносно меншою порівняно з обчислювальною складністю відновлення зображення, оскільки алгебраїчні методи вимагають обробки великої кількості систем одночасних рівнянь. Однак за певних умов обчислювальну складність можна зменшити до рівня, необхідного для традиційних методів у частотній області [2].

4. Методи покращення зображення орієнтовані на вирішення конкретних проблем, тоді як методи відновлення зображення є загальними та спрямовані на моделювання погіршення якості та застосування зворотного процесу з метою реконструкції вихідного зображення [2].

5. Маски використовуються в методах просторової області для покращення зображення, але маски не використовуються в методах відновлення зображення [2].

6. Розтягнення контрасту вважається методом покращення зображення, оскільки воно базується на приємних аспектах перегляду, тоді як усунення розмитості зображення шляхом застосування функції зняття розмитості вважається методом відновлення зображення [2].

Типи пошкоджень і спотворень цифрових зображень.

1. Шумом називають випадкові небажані зміни яскравості або кольору пікселів, які з'являються внаслідок роботи сенсорів камери, електронних перешкод, недостатнього освітлення або передачі даних. Шум знижує чіткість зображення та ускладнює аналіз деталей. Кожен тип шуму має власну математичну модель, особливості розподілу інтенсивностей і характерний візуальний прояв [2, 3].

Гауссів шум один із найпоширеніших типів випадкового шуму, значення якого підпорядковуються нормальному (гауссовому) розподілу. Він виникає через теплові процеси в електронних сенсорах камер, роботу матриці або помилки передавання сигналу. Гауссів шум рівномірно накладається на все зображення, спричиняючи випадкові коливання яскравості пікселів. На рис. 1 дрібнозерниста структура, яка рівномірно розподілена по всій поверхні кадру. Контури квадрата та кола залишаються добре помітними, однак межі стають менш чіткими. На гістограмі плавні дзвоноподібні піки.

Шум Релея описується розподілом Релея і використовується для моделювання фізичних процесів у радіолокаційних, ультразвукових та медичних системах візуалізації. Шум має асиметричний розподіл і впливає переважно на світлі ділянки зображення. На рис. 1 шум розподілений нерівномірно, світлі області містять більшу кількість зернистих артефактів. Межі об'єктів залишаються видимими, але текстура стає менш однорідною. Гістограма демонструє асиметричний характер розподілу із поступовим спадом значень.

Гамма-шум базується на гамма-розподілі та застосовується для моделювання процесів у лазерних, радіолокаційних і медичних системах.

Особливістю є нерівномірний розподіл інтенсивностей із переважанням певних діапазонів яскравості. На рис. 1 шум виглядає як неоднорідна зернистість, що помітно впливає на текстуру всіх областей. Гістограма має виражені асиметричні піки та нерівномірний розподіл яскравості.

Експоненціальний шум формується відповідно до експоненціального закону розподілу та використовується для моделювання випадкових процесів у системах передачі сигналів і радарних технологіях, характеризується значною концентрацією малих значень інтенсивності. На рис. 1 сильна зернистість, особливо в темних областях. Шум створює ефект нерівномірної текстури та знижує загальну якість сприйняття об'єктів. Гістограма демонструє різке накопичення значень у лівій частині та поступовий спад вправо.

Рівномірний шум – шум, значення якого однаково ймовірні в заданому діапазоні. Він виникає під час цифрового квантування, округлення сигналів та рівномірно впливає на всі області зображення. На рис. 1 однорідна зернистість без різких перепадів інтенсивності. Всі ділянки кадру зашумлені приблизно однаково. Контури геометричних фігур залишаються помітними, але втрачають плавність. Гістограма має майже прямокутну форму.

Імпульсний шум або інакше «сіль і перець» виникає через раптові помилки передачі даних, дефекти сенсорів або пошкодження цифрового сигналу. Характерною особливістю є поява окремих чорних і білих пікселів, які різко контрастують із сусідніми ділянками. На рис. 1 випадкові білі та чорні точки, розкидані по всьому кадру. Вони значно спотворюють структуру зображення та перекривають дрібні деталі. Гістограма містить різкі піки на крайніх значеннях яскравості біля чорного та білого кольорів.

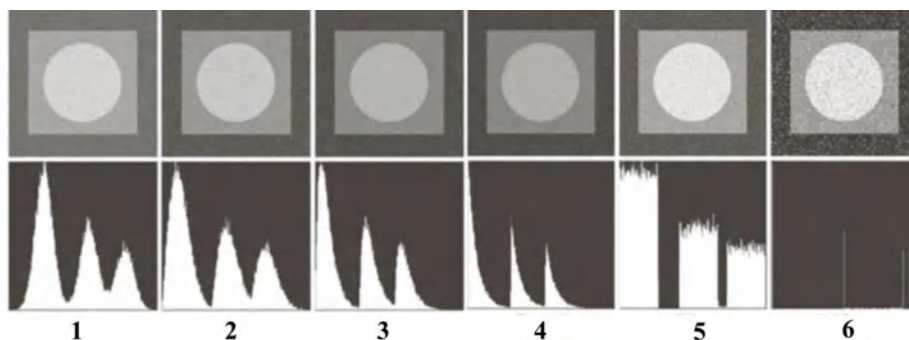


Рисунок 1 – Зображення та гістограми, отримані в результаті додавання 6 типів шумів [3]:
1 – Гауссовий шум; 2- шум Релея; 3 – гамма-шум; 5 – рівномірний шум; 6 – імпульсний шум

2. Розмиття є одним із найпоширеніших спотворень, при якому контури та дрібні деталі втрачають різкість. Основними причинами розмиття зображення є рух камери або об'єкта під час зйомки, неправильне фокусування, оптичні дефекти лінз та несприятливі атмосферні впливи. Серед типів виділяють розмиття через динамічне переміщення, розфокусування та розмиття, яке з'являється внаслідок специфічної фільтрації або природних оптичних процесів згладжування, англійською термінологією визначений як Gaussian Blur.

3. Втрата роздільної здатності виникає при недостатній кількості пікселів для передачі дрібних деталей. Зображення виглядає нечітким або

«пікселізованим». Причини виділяють низьку якість сенсора, сильне масштабування, компресія або обмеження обладнання.

4. Артефакти стиснення з'являються після використання алгоритмів стиснення. Вони проявляються у вигляді блоковості, розмиття меж, втрати текстур, спотворення кольорів. Артефакти виникають через втрату частини інформації під час компресії.

5. Колірні спотворення полягають у неправильному відтворенні кольорів, яскравості або контрасту. Причинами можуть бути некоректний баланс білого, вплив освітлення, дефекти сенсора. Типовими проявами є зміщення кольорової гама, надмірна насиченість, вицвітання та спотворення тіней і світлих ділянок.

6. Геометричні спотворення – це деформації форми або пропорцій об'єктів на зображенні. До них належать викривлення лінз, масштабні деформації, повороти та зміщення. Описані дефекти виникають через особливості оптики або неправильне положення камери.

7. Деградація старих фотографій та відео як тип спотворення зображень характерна для архівних матеріалів та полягає у вицвітанні, пожовтінні, тріщинах на певних ділянках зображення, плямах, хімічних пошкодженнях та зернистості плівки. Дані дефекти потребують комплексної цифрової реставрації та реконструкції.

2 Методологічні засади застосування нейромережових методів обробки зображень та експериментальні складові дослідження

Особливості обробки візуальних даних у системах штучного інтелекту (надалі – ШІ) полягають у використанні спеціалізованих алгоритмів, математичних моделей та нейронних мереж для автоматизованого аналізу, інтерпретації, класифікації, реконструкції та генерації зображень і відео. Візуальні дані у системах ШІ представлені у вигляді цифрових зображень, відеопотоків, тривимірних моделей або послідовностей кадрів, що складаються з пікселів та числових характеристик.

Однією з особливостей є автоматичне виділення ознак. У класичних системах ознаки задавалися вручну, наприклад контури, кути або текстури. У системах штучного інтелекту, особливо в глибоких нейронних мережах, ознаки формуються автоматично в процесі навчання моделі. Система самостійно визначає важливі характеристики об'єктів, форм, текстур, кольорів та просторових залежностей.

Ще однією характерною рисою є висока обчислювальна складність обробки зображень. Візуальні дані містять велику кількість параметрів, тому для роботи систем штучного інтелекту використовуються графічні процесори, тензорні процесори, паралельні обчислення, хмарні обчислювальні платформи.

У системах штучного інтелекту широко застосовується навчання на великих наборах даних. Якість і різноманітність тренувальних зображень безпосередньо впливають на точність моделі. Для цього використовуються великі набори даних, що містять мільйони зображень із різними об'єктами, умовами освітлення, ракурсами та рівнями шуму.

Особливого значення набуває аугментація даних, тобто штучне розширення набору даних шляхом поворотів, масштабування, зміни яскравості, дзеркального відображення, додавання шуму, аби підвищити стійкість моделей до варіацій візуальної інформації.

Особливістю ШІ-систем є також здатність виконувати семантичний аналіз зображень, тобто не лише розпізнавати форми, а й інтерпретувати зміст сцени. Задана особливість реалізується у задачах класифікації об'єктів, сегментації, розпізнавання обличчя, автономного керування транспортом та інших. На відміну від класичних алгоритмів, моделі ШІ здатні враховувати контекст зображення, прогнозувати відсутню інформацію на основі навчених закономірностей.

2.1 Заповнення пошкоджених або відсутніх ділянок.

Принцип полягає в тому, щоб отримати зображення пошкодженої або зіпсованої ділянки та спробувати використати збережену інформацію з відомих ділянок пошкодженого зображення для відновлення пошкодженої ділянки. Методи цифрового відновлення зображень можна розділити на дві основні категорії: традиційні методи відновлення зображень та методи відновлення зображень на основі глибокого навчання [4].

Одним із базових підходів до заповнення пошкоджених областей є контекстне відновлення, принцип якого полягає у використанні інформації з навколишніх ділянок зображення для реконструкції відсутнього фрагмента. Алгоритм аналізує текстури, кольори, структури, контури та просторові закономірності сусідніх областей, після чого прогнозує найбільш імовірний вміст пошкодженої частини. Контекстне відновлення базується на припущенні, що візуальна інформація у зображенні має певну локальну та глобальну узгодженість, тому відсутні області можуть бути відновлені на основі вже наявних даних.

Процес відновлення зображення полягає в наступному: (1) Введення маскованого зображення та доповнювального зображення (масковане зображення та доповнювальне зображення є реальним зображенням); (2) Дві витягнуті характеристики зображення були об'єднані та введені у генератори; (3) Зображення, реконструйоване генератором, та реальне зображення вводяться в дискримінатор; (4) Згенероване зображення, об'єднане зображення та реальне зображення вводяться в дискримінатор; (5) Дискримінатори видають результати та передають назад до кодера, генератора та дискримінатора для оновлення параметрів мережі та навчання мережі [4].

Нейромережеві методи генерації відсутніх фрагментів активно використовуються у цифровій реставрації старих фотографій, відновленні відео, видаленні небажаних об'єктів, реконструкції пошкоджених документів, покращенні медичних зображень та створенні візуального контенту. Водночас такі системи потребують значних обчислювальних ресурсів, великих навчальних вибірок і можуть створювати артефакти або помилкові реконструкції у випадку недостатньої кількості контекстної інформації.

Remini AI – платформа на основі штучного інтелекту для відновлення та реконструкції пошкоджених або низькоякісних зображень. У системі використовуються нейромережеві алгоритми глибокого навчання, які автоматично аналізують структуру фотографії та відновлюють втрачені деталі обличчя, текстур і контурів. Remini AI здатний усувати дефекти старих фотографій, заповнювати пошкоджені області, підвищувати різкість і покращувати загальну якість зображення. Особливо ефективним сервіс є при реставрації архівних портретів і фотографій із низькою роздільною здатністю, оскільки система використовує генеративні моделі для реконструкції відсутніх фрагментів та відтворення природних деталей. Завдяки автоматизованому аналізу контексту зображення сервіс забезпечує швидке та реалістичне цифрове відновлення візуального контенту [11].

Результати дослідження. На основі рис. 2 аналіз результатів відновлення фотографії за допомогою сервісу Remini AI демонструє значний прогрес у роботі з пошкодженими архівами, де штучний інтелект успішно нівелював фізичні дефекти, такі як білі плями, глибокі подряпини та обірвані краї, замінивши їх логічно добудованими текстурами та м'яким градієнтним фоном.



Рисунок 2 – Початкове зображення та результат реставрації

У процесі реставрації алгоритм використав нейронні мережі для генерації високої деталізації, фактично «домисливши» відсутні елементи, чіткий контур зіниць, вії, текстуру шкіри та окремі пасма волосся, що перетворило зернисте зображення на чистий портрет. Квітковий принт сукні інтерпретований як флористичні елементи, підвищило загальну контрастність, хоча ШІ діяв за принципом «галюцинації» деталей, роблячи риси обличчя більш симетричними та ідеальними.

2.2 Усунення розмиття.

Розмиття цифрових зображень є одним із найпоширеніших типів деградації візуальної інформації, який призводить до втрати чіткості контурів, дрібних деталей та текстур. У результаті розмиття зображення стає менш

інформативним, що ускладнює його подальший аналіз, розпізнавання об'єктів та автоматизовану обробку.

Цифрові зображення часто мають розмитість у вигляді розмитості від руху, гауссової розмитості та середньої розмитості. Розмиття від руху виникає внаслідок відносного руху між системою зйомки та зображенням, і його відновлення вимагає оцінки траєкторії руху. Гауссове розмиття передбачає застосування математичної функції до зображення для створення розмиття. Гауссове розмиття здебільшого застосовується для зменшення шуму та деталей шляхом об'єднання пікселів. Середнє розмиття виникає внаслідок набору пікселів, що дорівнюють значенню середнього пікселя в певному блоковому оточенні [5].

Основу методів відновлення різкості складають згорткові нейронні мережі, які навчаються на великих наборах чітких та розмитих зображень. У процесі навчання мережа формує здатність визначати закономірності деградації та відновлювати текстури, контури й високочастотні компоненти зображення. Ефективно усувають локальні дефекти та покращують деталізацію навіть у випадках складного розмиття.

Для задач деблюрингу активно застосовуються автоенкодері, які стискають візуальну інформацію у приховане представлення, а потім реконструюють зображення з покращеною різкістю. Такі моделі дозволяють усувати шум і відновлювати структурні особливості сцени. Високу ефективність демонструють генеративно-змагальні мережі, у яких генератор створює відновлене зображення, а дискримінатор оцінює його реалістичність. У результаті модель навчається формувати природні текстури та деталізовані контури, максимально наближені до оригіналу.

Нейромереві методи відновлення різкості активно використовуються у цифровій фотографії, мобільних камерах, системах відеоспостереження, супутниковій зйомці, кінематографії та реставрації архівних матеріалів. Вони дозволяють автоматизувати процес покращення якості зображень та значно перевершують класичні алгоритми за точністю й адаптивністю. Водночас такі методи потребують великих обчислювальних ресурсів, значних обсягів навчальних даних і можуть створювати артефакти або штучні деталі у випадку недостатньої інформації.

Результати дослідження. На рис. 3 обробка виконана моделлю Gemini 3 Flash (із застосуванням інструменту Nano Banana 2), яка є передовим генеративним ШІ, здатним до реконструкції візуальних даних. У процесі усунення розмиття нейромережа підвищила різкість, провела інтелектуальний аналіз сцени, розпізнала складну геометрію металевої скульптури, ажурні візерунки золотистих пелюсток лотоса та динаміку води, фактично відновивши втрачену інформацію на основі контексту. Порівнюючи стан «до» та «після», можна побачити різку трансформацію – відсутній ефект змазування змінився на високу деталізацію, де кожне пасмо волосся скульптури, дрібна перфорація металу та окремі краплі фонтану стали чіткими та контрастними. ШІ розділив плани, повернувши глибину

задньому фоні з деревами та прозорість воді, при цьому повністю зберігши оригінальну композицію, колірну гаму та художню суть знімка, що робить результат максимально реалістичним і позбавленим артефактів обробки [12].



Рисунок 3 – Початкове зображення та результат усунення розмиття

2.3 Видалення шуму.

Системи ШІ для видалення шуму – це напрямок у цифровій обробці зображень, який використовує нейронні мережі та алгоритми машинного навчання для автоматичного усунення шумів із зображень і відновлення їх чистоти, чіткості та структурної інформації. Основна мета полягає не лише у зменшенні шуму, а й у збереженні важливих деталей, текстур і контурів, які втрачаються при застосуванні класичних фільтрів.

Моделі ШІ навчаються структурі чистих художніх зображень та статистичним характеристикам різних типів шуму, завдяки чому можуть краще розрізняти значущі деталі та шум. Багатомасштабні екстрактори ознак, механізм уваги, навчання з урахуванням перцепційних втрат та суперечливе навчання дозволяють зберегти найдрібніші художні деталі, такі як градієнти текстури, тональні зміни та стилістичні особливості, які класичні засоби шумозаглушення, як правило, розмивають. Важливо, що такі моделі ШІ можуть адаптуватися до різних художніх стилів, що стає можливим завдяки навчанню на відібраних наборах даних, що включають художню фотографію, цифрові портрети, стилізовані зображення, і відтворення сканованих фотоплівок [6].

Системи ШІ для видалення шуму широко застосовується у цифровій фотографії, мобільних камерах, відеоспостереженні, медицині, наприклад, МРТ та КТ-зображення, супутниковій зйомці, астрономії та кінематографії, де якісне шумозаглушення є критично важливим для точного аналізу та інтерпретації візуальних даних. Водночас ці системи мають певні обмеження. Вони потребують великих навчальних наборів даних, значних обчислювальних ресурсів і можуть іноді «переочищати» зображення, втрачаючи дрібні деталі або створюючи штучні артефакти.

Результати дослідження. Інструмент усунення шуму від Topaz Labs (зокрема актуальна модель Denoise Max 2026 року) представляє передове рішення на базі глибокого навчання, яке кардинально відрізняється від традиційних фільтрів розмиття. Замість простого згладжування пікселів, ШІ

аналізує мільйони пар зображень, щоб навчитися відрізняти випадковий цифровий шум від реальних деталей, таких як текстура шкіри, шерсть тварин або архітектурні елементи. Завдяки новій технології NeuroStream, модель здатна виконувати складні обчислення локально на комп'ютері користувача, ефективно видаляючи кольоровий та яскравіший шум навіть на знімках з екстремально високим ISO, при цьому не просто зберігаючи, а інтелектуально відновлюючи чіткість контурів, що робить цей інструмент незамінним для нічної та репортажної зйомки [13].

Аналіз роботи сервісу Toraz Labs на прикладі рис. 4 порівняння «до» та «після» демонструє ефективність інтелектуального видалення шуму. Нейромережа не просто розмиває дефекти, а реконструює структуру зображення, виокремлюючи корисний сигнал із цифрового хаосу. На початковому етапі знімок характеризується вираженою зернистістю та мікрошумами, які помітні на текстурі светра та контурах обличчя, створюючи ефект нечіткості. Після обробки алгоритмом інтелектуального шумозаглушення спостерігається повне очищення фону та поверхонь при одночасному посиленні мікροконтрасту в'язка одягу стає структурно виразною, погляд – чіткішим, а переходи світлотіні набувають плавності без втрати автентичності кадру. Підхід дозволяє уникнути характерного для традиційних методів ефекту «пластикової шкіри», зберігаючи елементи, що робить підсумковий результат значно якіснішим і придатним для професійного використання чи друку у великому форматі [13].



Рисунок 4 – Початкове зображення та результат видалення шуму

2.4 HDR-реконструкція зображень.

HDR-реконструкція зображень є напрямом цифрової обробки візуальної інформації, що спрямований на розширення динамічного діапазону яскравості та відновлення деталей у сценах із високим контрастом.

Завдання відтворення зображень із високим динамічним діапазоном із динамічних сцен полягає в об'єднанні декількох зображень із низьким динамічним діапазоном із різною експозицією для створення зображення з ширшим динамічним діапазоном та покращеною деталізацією. Однак наявність рухомих об'єктів у динамічних сценах часто призводить до появи артефактів, відомих як «привиди». Як наслідок, науковцями запропоновано алгоритми усунення «привидів» у HDR-зображеннях для забезпечення створення високоякісних HDR-зображень. Методи реконструкції HDR динамічних сцен

можна розділити на три групи: традиційні методи, методи на основі глибоких нейронних мереж (надалі – CNN) та підходи, що використовують архітектури CNN-Transformer [7].

Kalantari та ін. [8] стали піонерами у використанні методів глибокого навчання для реконструкції HDR-зображень динамічних сцен. Спочатку їх метод використовує алгоритм оптичного потоку для вирівнювання вхідних зображень з багаторазовою експозицією, а потім застосовує підхід на основі CNN для об'єднання вирівняних LDR-зображень у HDR-представлення.

Відновлення деталей у світлих і темних областях є ключовою задачею HDR-обробки. У світлих ділянках часто виникає ефект пересвічення, коли інформація про текстури та межі об'єктів повністю втрачається через насичення сенсора. У темних областях навпаки спостерігається недостатня освітленість, що призводить до приховання дрібних деталей та злиття об'єктів із фоном. Завданням HDR-реконструкції є відновлення втраченої інформації шляхом оцінювання реального рівня яскравості сцени та корекції експозиції.

Нейромереві методи HDR-реконструкції застосовуються у цифровій фотографії, кінематографії, мобільних камерах, автономних системах, медичній візуалізації та супутниковій зйомці. Вони забезпечують значне покращення якості зображень у складних умовах освітлення та дозволяють отримувати більш інформативні та візуально природні результати.

Водночас мають обмеження, зокрема високу обчислювальну складність, залежність від якості навчальних даних та є слід виключати ризик появи штучних артефактів або неприродного освітлення при некоректному навчанні моделі.

Результати дослідження. Як показано на рис. 5, коли зображення містять значну кількість переекспонованих світлих ділянок та недоекспонованих темних ділянок (таких як полум'я та деталі обличчя в темних ділянках), HDR-зображення, відтворені методами на основі нейронних мереж, зазвичай втрачають високочастотні деталі та виглядають розмитими. Натомість метод на основі моделі CNN-Transformer демонструє кращі результати, дозволяє відтворити більш насичені деталі, такі як полум'я в області червоного прямокутника та деталі обличчя в області зеленого прямокутника [14, 15].

2.5 Колоризація чорно-білих зображень.

Колоризація чорно-білих зображень є напрямом цифрової обробки та реконструкції візуального контенту, що передбачає автоматичне або напівавтоматичне додавання кольорової інформації до монохромних зображень. Основною метою є відтворення реалістичного кольорового вигляду сцен, які були зафіксовані без кольору, з урахуванням контексту об'єктів, матеріалів, освітлення та семантики сцени. Колоризація широко застосовується у реставрації архівних і історичних фотографій, кіноматеріалів, музейних колекцій та культурної спадщини.

Автоматичне відновлення кольорової інформації базується на аналізі структурних і текстурних характеристик чорно-білого зображення та

прогнозуванні відповідних кольорових значень для кожного пікселя. Оскільки вхідне зображення містить лише інформацію про яскравість, задача колоризації є типовою оберненою задачею, де необхідно відновити відсутню інформацію про колір на основі статистичних закономірностей і контексту сцени.

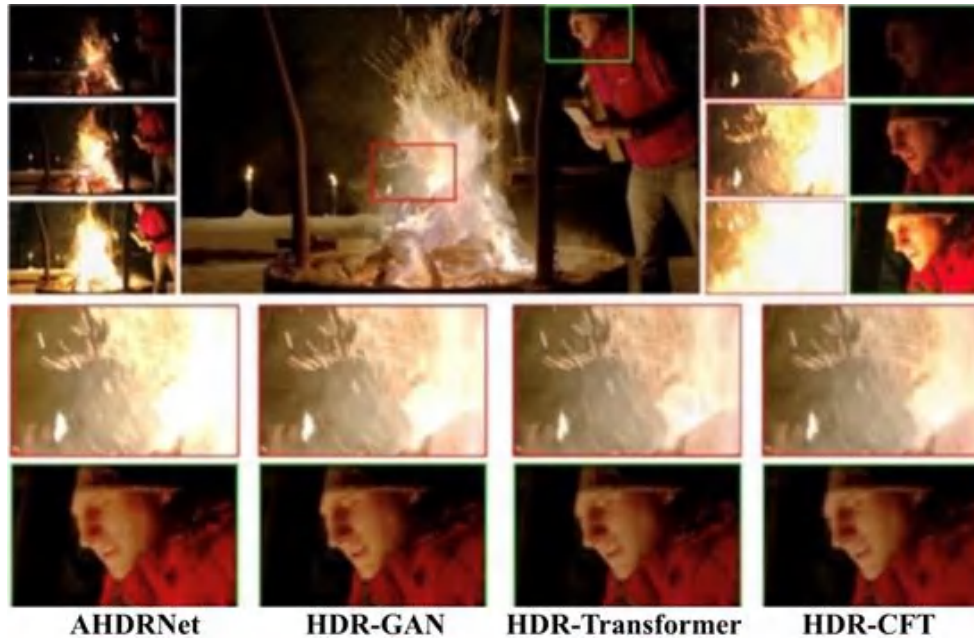


Рисунок 5 – Візуальне порівняння з іншими методами на тестовому наборі даних [16]

Сучасні нейромережеві методи колоризації архівних та історичних фотографій базуються на глибокому навчанні, моделі навчаються на великих наборах кольорових зображень, які автоматично перетворюються у чорно-білий формат для навчання. У процесі навчання мережа вивчає відповідність між структурою сцени та типовими кольорами об'єктів для відновлення кольорової інформації. Генеративно-змагальні мережі здатні створювати більш реалістичні та природні кольори. Генератор формує кольорове зображення, а дискримінатор оцінює правдоподібність, що стимулює модель до створення візуально узгоджених результатів. Завдяки цьому зменшується ефект «штучних» або неприродних кольорів, який виникав у ранніх алгоритмах.

Важливим компонентом є семантичний аналіз об'єктів, який дозволяє враховувати зміст сцени під час відтворення кольорів. Системи ШІ не лише аналізують піксельні значення, а й визначають, які об'єкти присутні на зображенні, наприклад, небо, рослинність, шкіра людини, будівлі чи транспорт. Відповідно застосовує типові кольорові шаблони, небо має відтінки синього, рослинність – зеленого, а шкіра людини – природні тілесні тони.

Нейромережеві методи колоризації активно застосовуються для відновлення історичних фотографій, архівних документів, кіноплівки, у сфері медіавиробництва та цифрової реставрації культурної спадщини. Вони дозволяють не лише покращити візуальне сприйняття старих матеріалів, а й зробити їх більш зрозумілими для сучасного глядача.

Незважаючи на свою новизну, колоризація зображень за допомогою методів глибокого навчання, пов'язаних зі ШІ, може бути складним завданням.

Важко успішно зберегти ідентичність та позу об'єкта на оригінальній фотографії, не видаляючи численні артефакти, які можуть спостерігатися або бути суттєвими на старовинних чорно-білих фотографіях низької якості. Невдала колоризація зображення за допомогою глибокого навчання може створити хибне враження про об'єкти зйомки та, що ще важливіше, передати значну дезінформацію щодо особистих та естетичних характеристик об'єкта на зображенні [9].

Результати дослідження. DeepAI – багатофункціональна платформа на основі ШІ, яка спеціалізується на демократизації складних алгоритмів машинного навчання через прості у використанні програмні інтерфейси та веб-інструменти. Сервіс пропонує широкий спектр можливостей від генерації унікальних зображень за текстовим описом та редагування фотографій до обробки природної мови та розпізнавання складних візуальних патернів. Архітектура базується на поєднанні генеративно-змагальних мереж та глибоких згорткових нейромереж, тому система не просто формально обробляє дані, а «розуміє» контекст пікселів, завдяки чому інструменти на кшталт колоризації або стилізації художніх образів виглядають цілісно та природно. Платформа орієнтована як на розробників, що інтегрують ШІ у продукти, так і на звичайних користувачів, надаючи швидкий доступ до технологій майбутнього без необхідності володіти глибокими технічними знаннями чи потужним апаратним забезпеченням [17].

Аналіз роботи Deep AI на прикладі рис. 6 у контексті колоризації архівного знімка демонструє роботу нейронних мереж, що базуються на розпізнаванні об'єктів для відтворення логічної колірної гами, де чорно-білий оригінал трансформується у повноколірну сцену завдяки сегментації зображення. На етапі «до» класична монохромна фотографія з високим рівнем шуму та втраченою насиченістю, тоді як на етапі «після» ШІ успішно ідентифікував природні та архітектурні елементи, надавши деревам органічного зеленого відтінку, небу – м'якої блакиті, а цегляним будинкам – характерних теракотових пісочних тонів.



Рисунок 6 – Початкове зображення та результат колоризації

Хоча модель демонструє високу точність у відтворенні загальної атмосфери сонячного дня, аналіз деталей виявляє певні особливості алгоритмів колоризації, такі як нерівномірне накладання кольору на дрібних об'єктах (наприклад, на людях або тролейбусі) та появу легких фіолетових артефактів на

бруківці в тіні, що є типовим для автоматизованих систем, які намагаються інтерпретувати складні світлотіньові переходи. В цілому, результат колоризації суттєво підвищує візуальну доступність історичного кадру, додаючи йому глибини та реалістичності за рахунок відновлення спектральних характеристик об'єктів, які раніше були приховані в градаціях сірого [17].

2.6 Нейромережеве збільшення роздільної здатності.

Інтелектуальне збільшення роздільної здатності зображень – це класична задача в галузі комп'ютерних наук, що передбачає покращення візуальної якості зображень за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. На відміну від традиційного масштабування, при якому нові пікселі створюються шляхом математичної інтерполяції, сучасні системи використовують нейронні мережі для інтелектуального відновлення деталей, текстур і контурів. Метою є не лише збільшення розміру зображення, а й реконструкція втраченої високочастотної інформації, яка відсутня у низькороздільному оригіналі.

Інтелектуальне масштабування зображень базується на аналізі структури сцени, текстур, геометричних форм та закономірностей розташування пікселів. Під час роботи система штучного інтелекту прогнозує, якими повинні бути відсутні деталі після збільшення зображення. Це дозволяє уникнути типових дефектів традиційного масштабування, таких як пікселізація, розмиття контурів або втрата чіткості. Незважаючи на наявність багатьох поширених методів підвищення роздільної здатності зображень, найбільш застосованим є нейронні мережі, а саме клас глибоких штучних нейронних мереж. Останнім часом CNN набули популярності завдяки високій ефективності у вирішенні завдань класифікації зображень. Серед кількох причин її успіху: 1) успіх у впровадженні та навчанні на сучасних потужних графічних процесорах; 2) швидкість та якість; 3) наявність великої кількості даних, готових для навчання великих і складних моделей, робить CNN дуже привабливою для завдань, пов'язаних із зображеннями.

Особливо високу якість демонструють генеративно-змагальні мережі, які здатні генерувати нові текстури та візуальні деталі. У системах генератор створює збільшене зображення, а дискримінація оцінює реалістичність. Завдяки цьому генеративно-змагальні мережі формують більш природні текстури, чіткі контури та реалістичні дрібні елементи, що робить результати максимально наближеними до оригінальної високоякісної фотографії.

Нейромережеве покращення якості контенту включає не лише збільшення роздільної здатності, а й реконструкцію зображення. Системи ШІ можуть одночасно видаляти шуми, усувати артефакти стиснення, підвищувати різкість, відновлювати текстури, покращувати контрастність, реконструювати пошкоджені ділянки. Завдяки здатності значно покращувати якість старих фотографій, архівних відео, цифрових зображень низької якості та контенту, отриманого з мобільних пристроїв або систем відеоспостереження.

Водночас нейромережеві методи мають певні обмеження. Вони потребують значних обчислювальних ресурсів, великих наборів навчальних даних і можуть

створювати штучні текстури або артефакти у випадках недостатньої інформації у вихідному зображенні. Крім того, згенеровані деталізації не завжди відповідають реальному вигляду оригінальної сцени, оскільки система прогнозує відсутні елементи на основі статистичних закономірностей.

Результати дослідження. Upscale.media – сучасний інструмент на основі ШІ, призначений для поліпшення якості цифрових зображень шляхом інтелектуального масштабування та реконструкції деталей. У процесі обробки система використовує алгоритми глибокого навчання для аналізу структури зображення, відновлення втрачених текстур, підвищення різкості контурів і зменшення артефактів, які виникають при збільшенні роздільної здатності традиційними методами [18].

На відміну від стандартної інтерполяції, що розтягує пікселі, Upscale.media здійснює семантичний аналіз візуального контенту, завдяки чому зображення після масштабування зберігає природний вигляд і деталізацію. Сервіс підтримує автоматичне усунення шумів, покращення кольорової гами та оптимізацію якості фотографій низької роздільної здатності [18].

На рис. 7 продемонстрована робота сервісу Upscale.media, простежується покращення візуальної якості після застосування алгоритмів інтелектуального масштабування.



Рисунок 7 – Початкове зображення та результат збільшення роздільної здатності

У вихідному зображенні (ліворуч) характерні дефекти старих цифрових копій, низька деталізація, розмитість контурів, зернистість, недостатня чіткість текстур дерев'яного покриття мосту та архітектурних елементів конструкції. Після обробки (праворуч) нейромережева система виконала реконструкцію дрібних деталей і підвищила локальну різкість зображення, чіткішими стали лінії мостових тросів, фактура дерев'яного настилу, контури цегляної арки та декоративних елементів споруди. Одночасно спостерігається зменшення шумів і вирівнювання кольорових переходів, завдяки чому небо, хмари та тіні набули більш природного вигляду. Алгоритм покращив сприйняття глибини перспективи, зробивши центральну композицію візуально виразнішою. Важливо, що сервіс не лише збільшив роздільну здатність, а й здійснив інтелектуальне відновлення текстур і структурних елементів, що є характерною перевагою сучасних ШІ-моделей над класичними методами масштабування зображень [18].

Висновки

У результаті проведеного дослідження теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено високу ефективність нейромережових методів у задачах реконструкції, відновлення та покращення цифрових зображень. Аналіз підходів до обробки візуальних даних засвідчив, що впровадження систем на основі ШІ стало якісно новим етапом розвитку мультимедійних технологій, оскільки нейронні мережі здатні не лише усувати дефекти зображень, а й здійснювати інтелектуальне прогнозування та реконструкцію втраченої інформації на основі контекстного аналізу сцени.

Сформовано понятійно-категоріальний апарат та визначено відмінності між процесами реконструкції, відновлення й покращення зображень.

Встановлено, що нейромережові методи демонструють найбільшу ефективність при роботі зі складними типами деградацій, серед яких шум, розмиття, втрата роздільної здатності, артефакти стиснення, колірні та геометричні спотворення та пошкодження архівних фотографій. На відміну від класичних алгоритмів цифрової обробки, генеративні моделі враховують семантичні зв'язки між об'єктами сцени, формують ознаки зображення та реконструюють деталі, що були відсутні у вихідних даних. Доведено, що використання глибоких нейронних мереж, генеративно-змагальних архітектур, і гібридних моделей забезпечує значно вищий рівень деталізації, реалістичності та візуальної узгодженості результатів порівняно з традиційними методами фільтрації та інтерполяції.

Результати експериментальної частини дослідження підтвердили високу результативність нейромережових сервісів у задачах реставрації зображень, шумозаглушення та усунення розмиття. У процесі реставрації пошкоджених фото встановлено, що системи генеративного ШІ здатні ефективно відновлювати відсутні фрагменти, реконструювати текстури, контури та дрібні структурні елементи за наявності значних фізичних пошкоджень зображення. Особливо важливим є те, що алгоритми не лише маскують дефекти, а формують нові візуальні елементи на основі аналізу контексту та статистичних закономірностей.

Дослідження методів усунення розмиття засвідчило, що нейромережові моделі здатні ефективно усувати динамічне та гауссове розмиття, відновлюючи чіткість контурів і текстур без суттєвої втрати деталей. Аналіз систем шумозаглушення показав, що моделі ШІ перевершують класичні фільтри завдяки здатності відокремлювати корисний сигнал від цифрового шуму зі збереженням дрібних текстур, тональних переходів і природної структури зображення.

Окрему увагу приділено HDR-реконструкції та колоризації чорно-білих фотографій. Встановлено, що використання гібридних архітектур дозволяє ефективніше відновлювати деталі у світлих і темних ділянках сцени, мінімізуючи появу артефактів та ефекту «привидів» у динамічних HDR-зображеннях. Порівняльний аналіз показав, що сучасні моделі забезпечують значно вищу якість реконструкції високочастотних деталей порівняно з традиційними підходами. У

задачах колоризації встановлено, що нейромережеві системи здатні виконувати семантичний аналіз сцени та автоматично відновлювати логічну кольорову гаму об'єктів. Водночас були виявлені певні обмеження автоматизованої колоризації, пов'язані із ризиком появи неприродних кольорів, артефактів та потенційного викривлення історичної достовірності архівних матеріалів.

Використання нейромереж для збільшення роздільної здатності та інтелектуального масштабування зображень дозволяє досягти вищої якості результатів, ніж застосування традиційних алгоритмів інтерполяції. Системи на основі ШІ забезпечують не лише збільшення кількості пікселів, а й реконструкцію текстур, контурів і структурних особливостей сцени. Встановлено, що алгоритми здатні усувати шум, покращувати локальний контраст і відновлювати деталізацію навіть у випадках значної втрати роздільної здатності. При цьому результати характеризуються більш природним виглядом та меншою кількістю цифрових спотворень порівняно з класичними методами масштабування.

Згорткові нейронні мережі демонструють високу ефективність у задачах локальної реконструкції та аналізу текстур, однак мають обмеження у врахуванні глобального контексту сцени. Генеративно-змагальні мережі забезпечують більш реалістичне відтворення деталей і текстур, проте можуть створювати штучні елементи або так звані «галюцинації» даних. Найбільш перспективними визначено гібридні моделі, які поєднують переваги локального аналізу текстур та глобального контекстного моделювання, забезпечуючи високу якість реконструкції при роботі зі складними сценами.

Практичне значення даного дослідження полягає у можливості широкого використання нейромережевих методів у мультимедійних системах, цифровій фотографії, кінематографії, відеоспостереженні, медичній візуалізації, супутниковій зйомці, системах безпеки та цифровій реставрації культурної спадщини.

Водночас результати дослідження засвідчили, що нейромережеві методи мають обмеження, серед яких висока обчислювальна складність, потреба у великих наборах навчальних даних, залежність від якості тренувальних вибірок та ризик генерації недостовірних деталей. У зв'язку з цим подальший розвиток технологій реконструкції зображень повинен бути спрямований на підвищення енергоефективності моделей, зменшення кількості артефактів, удосконалення механізмів контролю достовірності реконструйованих даних та створення більш адаптивних архітектур, здатних працювати з різними типами візуальної деградації. Перспективними напрямками подальших досліджень є інтеграція мультимодальних моделей ШІ, розвиток дифузійних архітектур, використання самонавчальних систем та поєднання нейромережевих підходів із методами комп'ютерного зору та фізично обґрунтованого моделювання зображень.

Список літератури.

1. Miao Chu, Peng Wu, Guanyu Li, Wei Yang, Juan Luis Gutiérrez-Chico, Shengxian Tu (2023). Advances in Diagnosis, Therapy, and Prognosis of Coronary Artery Disease Powered by Deep Learning Algorithms. *JACC: Asia*, 3(1), 1-14 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772374722004008>.

2. Chakole, V.V. (n. d.). Image restoration and reconstruction. Elective – I: Digital Image Processing. https://kdkce.edu.in/writereaddata/fckimagefile/DIP%20Unit%206%20Vijay%20Chakole_1.pdf.
3. Özcan, C. (n. d.). Image Restoration and Reconstruction. <https://canerozcan.net/files/CPE409/Part6.pdf>.
4. Zhao, Li, & Zhao, Ruixia. (2020). Image Inpainting Research Based on Deep Learning. *International Journal of Advanced Network Monitoring and Controls*, 5(2), 23-30. https://www.researchgate.net/publication/344005062_Image_Inpainting_Research_Based_on_Deep_Learning.
5. Zhiyi, Yu (2023). Image deblurring: comparison and analysis. *Journal of Physics Conference Series* 2634(1), 012034 https://www.researchgate.net/publication/375783346_Image_deblurring_comparison_and_analysis.
6. Aulakh, D., Piakaray, D., Singh, P, & Barde, S.S. (2025). AI-based noise reduction in artistic photography. *Journal of Visual and Performing Arts*, 6(4s), 309-319. https://www.researchgate.net/publication/399144295_AI-BASED_NOISE_REDUCTION_IN_ARTISTIC_PHOTOGRAPHY.
7. Bai, B., & Wang, Y. (2024). High Dynamic Range Image Reconstruction of Dynamic Scenes via Hybrid CNN and Flatten-Transformer Info & Claims. 7th International Conference on Artificial Intelligence and Pattern Recognition. (p. 409-415). <https://doi.org/10.1145/3703935.3703954>.
8. Kalantari, N.K., & Ramamoorthi, R. (2017). Deep high dynamic range imaging of dynamic scenes [J/OL]. *ACM Transactions on Graphics*, 36(4), 144:1-144:12. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3072959.3073609>.
9. Delight, Sigauke. (2023). Using artificial intelligence (ai) powered web-based tools for the colorization of monochrome archival images National University of Science and Technology https://www.researchgate.net/publication/374195080_Using_artificial_intelligence_ai_powered_web-based_tools_for_the_colorization_of_monochrome_archival_images.
10. Zongxi, Cheng. (2023). Research on Image Up-scaling and Super-resolution Based on Convolutional Neural Network. *Science Engineering and Technology* 72:1258-1263 https://www.researchgate.net/publication/377790435_Research_on_Image_Up-scaling_and_Super-resolution_Based_on_Convolutional_Neural_Network.
11. Remini. (n.d.). Remini – AI Photo Enhancer. <https://remini.ai/>.
12. Google. (2026). Gemini 3 Flash (Nano Banana 2 version) [Large language model]. <https://gemini.google.com/>.
13. Topaz Labs. (2026). Topaz Photo AI (Denoise Max model) [Computer software]. <https://www.topazlabs.com/>.
14. Liu, Z, Wang, Y, Zeng, B, et al (2022). Ghost-free High Dynamic Range Imaging with Context-aware Transformer. <http://arxiv.org/abs/2208.05114>.
15. Bai, B.D, & Fan, J.L. (2015). Minimum bracketing exposure method for high dynamic range imaging. *Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications*, 20(5), 43-47. <http://arxiv.org/abs/2208.05114>.
16. Pérez-Pellitero, E, Catley-Chandar, S, Shaw, R, et al. (2022). NTIRE 2022 Challenge on High Dynamic Range Imaging: Methods and Results. <http://arxiv.org/abs/2205.12633>.
17. DeepAI. (n. d.). Image Colorizer. <https://deepai.org/machine-learning-model/colorizer>.
18. Shopsense Retail Technologies. (n. d.). Upscale.media. <https://www.upscale.media/>.
19. Інтересний Київ. (б. д.). Старий Київ. <https://www.interesniy.kiev.ua/category/fotogallereya/staryiy-kiyv/>.
20. Бобарчук, О.А., & Злотківська, Т.В. (2025). Використання штучного інтелекту для реставрації пошкоджених зображень та історичних фото. *Політ. Сучасні проблеми науки. Архітектура. Будівництво. Дизайн.* (с .158-160). <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/67444>.
21. Бобарчук, О.А., & Злотківська, Т.В. (2024). Інноваційні можливості розвитку штучного інтелекту за допомогою мультимодального підходу. *Наука, технологія, інновації*, 4(32), 134-141. <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-4-15>.

ANNOTATIONS

UDC 655.4

METHODOLOGY FOR DESIGNING MULTIMEDIA PUBLICATIONS IN A DIGITAL ENVIRONMENT

Khلامov S.

Ph.D., Associate Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics

ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

***Abstract.** The study focuses on the development of a methodology for designing multimedia publications in a digital environment. The proposed methodology integrates target audience analysis, information architecture development, UX and interactivity, visual design, and technological implementation. Practical application of the methodology enables the creation of digital products that ensure effective information perception, intuitive navigation, and a high level of user experience.*

***Keywords:** multimedia publication, digital environment, UX, information architecture, interactivity, design methodology.*

UDC 681.586:004.93:655.3

COMPENSATION MODEL FOR SIGNAL PROCESSING OF PRINTED TEXTILE SENSORS IN MULTI-LEVEL INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS

Panovyk U.

PhD (Engineering), Associate Professor,
Department of Computer Technologies in Publishing and Printing Processes,
Lviv Polytechnic National University

ORCID ID: 0000-0002-9663-4328

***Abstract.** Printed textile sensors fabricated using printed electronics technologies and the features of their signal processing in multi-level information and measurement systems are investigated. A mathematical model of signal formation is proposed, taking into account the parameters of the printed element, mechanical deformations, and environmental influences. An adaptive signal processing algorithm is developed, providing noise and drift compensation and improving measurement accuracy.*

***Keywords:** printed textile sensors, printed electronics, signal processing, adaptive model, information and measurement systems, simulation modeling.*

UDC 004.75

**DISTRIBUTED MICROSERVICES-ORIENTED INFORMATION
SYSTEM FOR ASTRONOMICAL DATA PROCESSING USING
OPENAPI SPECIFICATION**

Khlamov S.

Ph.D., Associate Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

Orlov S.

Ph.D. student, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0009-0008-0680-206X

Tabakova I.

Ph.D., Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0001-6629-4927

***Abstract.** The section is devoted to the implementation of the OpenAPI specification in a distributed microservice-oriented system for processing astronomical data. The method is the automation of processing processes using data mining and KDD methods. The proposed approach to interoperability, scalability and convenience of supporting systems. The system framework is implemented on the .NET Core platform in C# with Swagger integration. The solution can be used for processing astronomical images, implementing the Virtual Observatory concept and integrating with CI/CD.*

***Keywords:** information system, client-server architecture, microservices-oriented architecture, scalability, Swagger, OpenAPI, rest API, JSON, .net.*

UDC 004.048

**PROCESSING PIPELINE FOR ASTRONOMICAL DATA MINING
USING AI-BASED DECISION-MAKING RULES**

Khlamov S.

Ph.D., Associate Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0001-9434-1081

Netrebin Yu.

Ph.D. student, Department of Computer Modeling and Intelligent Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0009-0001-8778-3241

Trunova T.

Assistant, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0003-2689-2679

***Abstract.** The paper proposes an intelligent decision-support module for processing large-scale astronomical datasets, integrated with a PostgreSQL-based logging system and implemented in the Lemur software of the CoLiTec project. The hybrid approach (rule-based + AI) provides efficient monitoring, anomaly detection, and resource optimization, increasing decision-making speed by 65% and reducing failure recovery time by 50% compared to conventional methods.*

***Keywords:** decision making, data mining, artificial intelligence, big data, data processing, pipeline.*

UDC 004.5:004.8

**DESIGNING COGNITIVE-ADAPTIVE INTERFACES FOR
AI-BASED INTERACTIVE SCENARIO MODELING SYSTEMS**

Oliinyk V.

Post-graduate student, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-5584-1531

Biziuk A.

PhD, Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0001-9830-9206

***Abstract.** The chapter substantiates the concept of a cognitive-adaptive interface for AI-based interactive scenario modeling systems. It demonstrates the limitations of Chat UI and the relevance of transitioning to a human-in-the-loop architecture with visual control, control nodes, anomaly marking, and local scenario regeneration.*

***Keywords:** cognitive-adaptive interface, artificial intelligence, large language models, human-in-the-loop.*

UDC 004.8:37.018.43

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF TOPIC MODELING
OF TEXT CORPORA IN STUDIES OF THE USE
OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN
DISTANCE EDUCATION**

Slisarenko R.

PhD student, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0009-0009-3286-4333

***Abstract.** This chapter examines the theoretical and methodological principles of topic modeling of text corpora reflecting the use of artificial intelligence in distance education. A comparative analysis of classical and modern approaches to identifying thematic structures in text data within this subject area was conducted. The expediency of using a hybrid methodology based on informed priors for Latent Dirichlet Allocation and a formalized framework of dynamic contextual topic modeling using large language models is substantiated. It is shown that the proposed approach improves the semantic relevance, interpretability, and analytical suitability of the analysis results.*

***Keywords:** topic modeling, distance education, artificial intelligence in education, educational text corpora, latent dirichlet allocation, dynamic contextual topic modeling.*

UDC 371.333:004.032.6

METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR INTEGRATING DIGITAL TRAINING GAMES INTO MULTIMEDIA EDUCATIONAL RESOURCES

Khoroshevskaya I.

PhD of economic sciences, Associate Professor,
Department of Multimedia Systems and Technologies,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID ID 0000-0001-8990-9891

***Abstract.** This study examines the methodological principles underlying the integration of digital training games into multimedia educational resources. It justifies the pedagogical value of incorporating digital games into such resources, describes their educational and developmental functions, and examines the content and characteristics of the types of games suitable for implementation in multimedia educational resources. The stages of developing a digital training game as a structural and content element of a multimedia resource are summarised, and examples of its practical implementation are provided.*

***Keywords:** multimedia educational resources, digital training games, pedagogical value, approaches to integration, types of games.*

UDC 004.5+004.92

LOCAL COLOR CORRECTION OF CONTENT TO HARMONIZE WEB-PAGES

Kulishova N.

PhD of Design Automation Systems, Professor,
Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics,
ORCID ID: 0000-0003-1142-4100

Bilets D.

PhD of Engineering Sciences, Senior Lecturer,
Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics,
ORCID ID: 0000-0002-1521-826X

Harbuzova D.

Master's student, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics

***Abstract.** Modern web interfaces actively use dynamic visual content, which makes it difficult to maintain a consistent color scheme. The mismatch between the interface palette and image colors can disrupt visual harmony. The paper proposes a semantically oriented approach to color harmonization based on the CIELAB space. The method takes into account the image structure, preserves important elements, and selectively corrects secondary areas, ensuring a natural appearance and increasing the visual integrity of web interfaces*

***Keywords:** color correction, color harmonization, semantic segmentation, cielab color space, web-interfaces.*

UDC 004.92:004.89:004.5

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN AUTOMATING UX/UI DESIGN FOR WEB APPLICATIONS

Kraievska O.

Associate Professor, Department of Geometric Modeling and Computer Graphics,
National Technical University of KhPI
ORCID: 0000-0002-8460-958X

Shelikhova I.

Ph.D., Associate Professor, Department of Geometric Modeling and Computer Graphics,
National Technical University of KhPI
ORCID: 0000-0002-5637-1850

Adashevska I.

Ph.D., Associate Professor, Department of Geometric Modeling and Computer Graphics,
National Technical University of KhPI
ORCID: 0000-0002-8460-958X

***Abstract.** This paper examines the role of artificial intelligence in automating UX/UI design for web applications. It highlights generative design, interface personalization, and automated testing. A comparative analysis of traditional and AI-oriented approaches is presented, with efficiency criteria defined and a hybrid model proposed.*

***Keywords:** artificial intelligence, UX/UI design, generative design, interface personalization, automation, web applications.*

UDC 378.147:004.8:655

METHODOLOGICAL JUSTIFICATION FOR AI-INTEGRATED STEAM EDUCATION IN THE EDUCATIONAL PROCESS FOR FUTURE PROFESSIONALS IN THE PUBLISHING AND PRINTING INDUSTRY

Andriushchenko T.

Senior Lecturer, Department of Multimedia Systems and Technologies,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID ID: 0000-0001-8620-5717

***Abstract.** This paper examines the theoretical and methodological foundations for integrating AI into STEAM education for the training of future professionals in the publishing and printing industry. It demonstrates how combining the interdisciplinary STEAM approach with the modern capabilities of artificial intelligence can enhance the effectiveness of vocational education. The main principles of organising such training are outlined – integrity, practical focus, flexibility and a focus on innovation – and the pedagogical conditions for developing professional competencies in the field of digital publishing are defined. Particular attention is paid to the use of AI technologies in editorial and printing processes, specifically in design, typesetting, information processing and personalised learning. An approach to integrating artificial intelligence into the STEAM educational environment is proposed, which promotes the development of creativity, technical thinking and the capacity for innovative activity.*

***Keywords.** AI integration, steam education, methodological rationale, publishing and printing industry, vocational training, digital technologies, artificial intelligence, interdisciplinary approach, educational innovations, competence-based approach.*

UDC 004.92:37.091.3

INTEGRATION OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO WORKING WITH VECTOR CONTOURS IN THE COURSES “TYPE TECHNOLOGIES” AND “GRAPHIC INFORMATION PROCESSING”

Biziuk A.

Candidate of Technical Science (PhD), Associate Professor,
Professor, Department of Multimedia Systems and Technologies
Kharkiv National University of Radioelectronics
ORCID ID: 0000-0001-9830-9206

Andriushchenko T.

Senior Lecturer, Department of Multimedia Systems and Technologies,
Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID ID: 0000-0001-8620-5717

Horokhova I.

Assistant, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0009-0006-1194-4543

***Abstract.** The study presents a comparative analysis of the principles of teaching work with vector contours in Adobe Illustrator and FontLab. A methodological approach to the integration of these courses is substantiated, and recommendations are proposed for developing transferable skills in working with vector elements based on Bézier curves in student training.*

***Keywords:** vector contours, bézier curves, fontlab, adobe illustrator, type design, teaching methodology.*

UDC: 004.89:004.8

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR ANALYZING THE NEWS RELIABILITY AND IDENTIFYING THEIR SOURCES USING TRANSFORMER MODELS

Lozynska O.

PhD, Associate Professor, Information Systems and Networks Department,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-5079-0544

Vysotska V.

PhD, Associate Professor, Information Systems and Networks Department,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0001-6417-3689

Markiv O.

PhD, Associate Professor, Information Systems and Networks Department,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-1691-1357

Bakhmat K.

Student, Information Systems and Networks Department,
Lviv Polytechnic National University

***Abstract.** The section presents a prototype of an intelligent system for automated detection of disinformation and search for primary sources of information. The use of transformer models, particularly BERT, for text classification is justified. The proposed approach, based on machine learning and natural language processing methods, provides effective news analysis even with limited data. Using an approach based on model confidence assessment increases the interpretability of the results. The limitations of the system are identified and the directions of its further development are outlined.*

***Keywords:** disinformation, machine learning, natural language processing, bert model, web interface, transformer models.*

UDC 659.113:004

**FEATURES OF EARLY DIAGNOSTICS OF MULTIMEDIA
CAMPAIGN EFFECTIVENESS IN GOOGLE ADS**

Chebotarova I.

Senior Lecturer, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0003-0105-4484

Manakov V.

PhD in Engineering, Professor, Department of Media Systems and Technologies,
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0002-7410-5409

Artakov M.

Marketer, INDUSTRIAL AGENCY, LLC
ORCID ID: 0009-0007-7844-7047

Hrozian Ya.

Founding Designer, Lumos AI, San Francisco, California, USA
ORCID ID: 0009-0008-9389-6411

***Abstract.** The work examines the specifics and key stages of developing multimedia advertising campaigns, as well as modern approaches to their evaluation. A set of key performance indicators (KPIs) for assessing multimedia campaigns at different stages is defined, along with the specifics of using automated bidding strategies for launching such campaigns. In the experimental part, a methodology for early diagnostics of the effectiveness of multimedia campaigns for a construction materials store using Google Ads tools is developed. This methodology allows the detection of early signs of low performance and supports decision-making on optimizing creatives, audience targeting, and communication channels. To implement the methodology, a psychographic analysis of the target audience was carried out and advertising materials were developed.*

***Keywords:** multimedia advertising campaign, construction materials, google ADS, early diagnostics, effectiveness, metrics, segmentation, banner.*

UDC 004.9:37.013.8:159.955

**COGNITIVE ASPECTS AND THE EDUCATIONAL POTENTIAL OF
INFOGRAPHICS IN THE CONTEXT OF INCREASING INFORMATION FLOWS**

Selmenska Z.

Associate Professor, Department of Multimedia Technologies, Institute of Printing
and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-9514-7923

Dubnevych M.

Associate Professor, Department of Multimedia Technologies, Institute of Printing
and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0001-7089-0190

Mykytyuk O.

Professor, Department of Media Communications, Information, and Book Studies,
Institute of Printing and Media Technologies, Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-7237-4007

***Abstract.** This study examines the cognitive aspects of information perception through infographics and substantiates its educational potential in the context of information overload. Theories of dual coding, cognitive load, and visual thinking are analyzed as the basis for the effectiveness of infographics. The principles of creating infographics, taking into account the characteristics of cognitive perception, have been identified. The didactic possibilities of infographics and its impact on the development of analytical thinking and visual-communicative competence have been examined. It has been proven that the use of infographics increases the effectiveness of learning information and optimizes the educational process.*

***Keywords:** infographics, cognitive processes, information visualization, educational technologies, cognitive load, visual thinking, digital learning.*

UDC 658.512.2

INTEGRATION OF A STANDARDIZED BOULDERING BOARD INTO AN ARCHITECTURE FOR SIMULTANEOUS TRAINING MANAGEMENT

Guryev I.

Full-time professor, Department of Multidisciplinary Study,
Engineering Division, University of Guanajuato
ORCID: 0000-0001-6014-5912

Gurieva N.

Full-time professor, Department of Digital Art and Management,
Engineering Division, University of Guanajuato
ORCID: 0000-0002-1366-1292

***Abstract.** Standardized training boards such as the MoonBoard are the most popular tool for automated indoor boulder training. However, their control systems are normally implemented as isolated devices with no integration into gym management software. In this study we have developed a low-cost, open-source architecture that based on ESP32 LED matrix controller managing a 198-hold, 18×11 bouldering board with a RESTful web application that unifies member management, attendance tracking, and training session control under a single interface accessible to multiple users simultaneously. In this study, we have introduced the real-time synchronization of training state across concurrent web clients by means of polling-based protocol using the controller's state-update requests. The board can be operated both with its own basic frontend via direct client connection within the local network, as well as by means of the gym management software via proxy integration of the board's HTTP API. This, naturally, eliminates the need for separate Bluetooth pairing or proprietary mobile applications. A lightweight JSON/HTTP polling scheme with 1.5-second period was demonstrated to be short enough to achieve nearly flowless synchronization across multiple browser sessions. The system was deployed and validated at a small indoor climbing facility over a two-month period. Results indicate that the integrated architecture reduces front-desk administrative time, improves training efficiency and, due to high accessibility, increases the usage of the training board in general.*

***Keywords:** indoor climbing, IoT, ESP32, LED training board, gym management system, bouldering, MoonBoard, real-time synchronization.*

UDC 004.5:621.914.6

PRINCIPLES OF DESIGNING A DIGITAL TWIN AND USER INTERFACE FOR A MACHINE TOOL BASED ON SYSTEM MODELING OF THE GEAR CUTTING PROCESS

Soroka N.

PhD, Doctoral Researcher «Information Systems and Technologies»,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0009-0002-0944-2967

Hrytsai I.

Doctor of Science, Professor,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-3675-5897

Ogirko I.

Doctor of Science, Professor,
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0003-1651-3612

***Abstract.** Industry 5.0, as the next stage in industrial evolution, should put people back at the center of manufacturing processes. This can be achieved through the use of intelligent interfaces, where AI components will work in collaboration with professional operators on the production floor. This paper formalizes the basic principles for designing such interfaces for gear cutting processes.*

***Keywords:** Digital twins, interface, design, gear cutting.*

UDC 655.41: 004.91:004.8

**HYBRID MULTIMODAL TEXT DIGITIZATION
FOR PUBLISHING AND PRINTING**

Kulchytska Kh.

PhD in Engineering, Associate Professor, Multimedia Technologies Department,
Institute of Printing Art and Media Technologies of the
Lviv Polytechnic National University
ORCID ID: 0000-0002-6184-988X

***Abstract.** This paper investigates AI application in text input for the publishing sector. It establishes a classification system for digitization methods based on text complexity and defines key selection criteria. To improve the processing of complex content, the author proposes a hybrid Optical Character Recognition (OCR) and Automatic Speech Recognition (ASR) approach, alongside a specialized multimodal algorithm integrated into publishing workflows.*

***Keywords:** artificial intelligence, text digitization, text complexity group, publishing system.*

UDC 004.94:614.84

**PROACTIVE INTELLECTUAL SYSTEMS FOR EARLY DETECTION
AND ACTIVE PROTECTION OF OBJECTS FROM FIRE**

Kostarev D.

p.h.d., CEO of “Flexsys LLC”
ORCID ID: 0009-0006-7528-031X

Tevyashev A.

Dr. Tech., Prof.
ORCID ID: 0000-0001-5261-9874

Sizova N.

Doctor of Physical and Math. Sciences, Professor, Department of CS and IT,
Kharkiv National University of Urban Economy named after Beketov
ORCID ID: 0000 -0002-0103-1939,

Tkachenko V.

p.h.d, Professor, Department of "Media Systems and Technologies",
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID ID: 0000-0002-5076-0724

***Abstract.** The scientific and technical concept of proactive fire protection of facilities is substantiated, which combines early detection of signs of ignition, forecasting the development of a dangerous event, automated decision-making support and controlled active suppression of fire centers. The facility is a cyber-physical system that continuously measures the state of the external environment, analyzes video and thermal imaging data, assesses the risk, predicts the possible development of events and prepares a protective circuit in advance.*

***Keywords:** fire safety, artificial intelligence, computer vision, thermal surveillance.*

UDC 004.932:004.8

**THEORETICAL AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS
OF IMAGE RECONSTRUCTION USING NEURAL NETWORK
PROCESSING METHODS**

Bobarchuk O.

Head of the Department of Computer Multimedia Technologies,
PhD in Engineering, Associate Professor,
National University “Kyiv Aviation Institute”
ORCID ID: 0000-0003-3176-7231

Zlotkivska T.

Master’s degree, Department of Multimedia Systems and Technologies,
S. Kuznets Kharkiv National University of Economics
ORCID ID: 0009-0009-0661-8956

***Abstract.** This paper investigates the theoretical and methodological foundations of applying neural network methods for image reconstruction and restoration. The types of visual data degradation are systematised, and the features of automatic feature extraction and semantic scene analysis in AI systems are highlighted. The practical part of the study demonstrates the high effectiveness of specialised services in tasks such as the restoration of archival photographs, colourisation, HDR reconstruction and intelligent content upscaling.*

***Keywords:** artificial intelligence, neural networks, generative models, image reconstruction and restoration, colourisation.*

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Andriushchenko T.....	206	Гарбузова Д.С.....	168
Artakov M.	262	Горохова І.М.....	229
Chebotarova I.	262	Злотківська Т.В.	362
Dubnevych M.M.	297	Костарев Д.Б.....	345
Gurieva N.	315	Краєвська О.О.	191
Guryev I.....	315	Кулішова Н.Є.	168
Hrozian Ya.	262	Лозинська О.В.....	252
Hrytsai I.....	325	Марків О.О.	252
Kulchytska Kh.....	335	Нетребін Ю.М.	74
Manakov V.....	262	Олійник В.М.....	94
Mykytyuk O.M.....	297	Орлов С.В.	54
Ogirko I.	325	Пановик У.П.....	24
Selmenska Z.M.	297	Сізова Н.Д.....	345
Soroka N.....	325	Слісаренко Р.В.	118
Адашевська І.Ю.....	191	Табаківа І.С.....	54
Андрющенко Т.Ю.	229	Тевяшев А.Д.	345
Бахмат К.Ю.....	252	Ткаченко В.П.....	345
Бізюк А.В.	94, 229	Трунова Т.О.....	74
Білець Д.Ю.....	168	Хламов С.В.	6, 54, 74
Бобарчук О.А.	362	Хорошевська І.О.	133
Висоцька В.А.	252	Шеліхова І.Б.	191

Наукове видання

ВОВК Олександр Володимирович
ЧЕБОТАРЬОВА Ірина Борисівна
ДЕЙНЕКО Жанна Валентинівна

**Поліграфічні, мультимедійні та web-технології
у цифровому середовищі
Том 1**

Колективна монографія

(укр. та англ. мовами)

в авторській редакції

Відповідальний редактор

Дейнеко Ж. В.

Комп'ютерна верстка

Чеботарьова І. Б.

Технічний редактор

Гобельовська Л.П.

Підп. до друку 22.05.2026. Формат 60x84 1/16. Гарнітура Nimes New Roman
Спосіб друку цифровий. Ум. друк. арк. 22,8. Обл.-вид. арк. 28,1.
Наклад 50 прим. Зам. № 16



Видавець та виготовлювач: ТОВ «Друкарня Мадрид»
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18 Тел.: 0800 33 67 62
www.madrid.in.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК №4399 від 27.08.2012 р.