УДК 004.9:378.147:004.946

Олена Краєвська
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID 0000-0002-8460-958X
kraevsck@gmail.com

Інеса Шеліхова
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна
ORCID 0000-0002-5637-1850
inessa.shelikhova@gmail.com

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ НАВИЧОК СТУДЕНТІВ У НАВЧАННІ ОСНОВАМ ГРАФІЧНОЇ КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ ГІБРИДНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У статті представлено та обґрунтовано структурно-функціональну модель навчання та автоматизованого оцінювання композиційних навичок у VR-середовищі, інтегрованому в гібридну систему штучного інтелекту.
Модель розглядається як цілісна система, що інтегрує цільовий, змістово-технологічний, процесуальний та контрольно-результативний блоки. Її функціонування забезпечується взаємодією імерсивного VR-середовища та аналітичного модуля на базі гібридного штучного інтелекту, який поєднує rule-based аналіз класичних композиційних принципів із data-driven алгоритмами комп'ютерного зору.
Технічна логіка моделі базується на багаторівневому аналізі параметрів сцени, що забезпечує формалізований розрахунок центру візуальної ваги, динаміки ритму та геометричної рівноваги просторових елементів.
Наукова новизна дослідження полягає у створенні комплексної педагогічної моделі, здатної здійснювати автоматизовану перевірку параметрів 3D-сцени в реальному часі та формувати індивідуальний інтелектуальний зворотний зв'язок для студента на основі об'єктивних метрик. Практичне значення отриманих результатів підтверджено результатами педагогічного експерименту (N=39) із застосуванням спеціалізованих цифрових навчальних ресурсів та аналітики навчальних даних. Статистична обробка результатів за критерієм Пірсона χ^2 засвідчила статистично значуще ($p < 0,05$) підвищення рівня сформованості базових та профільних композиційних навичок у студентів експериментальної групи порівняно з контрольною. Водночас розроблені алгоритми автоматизованої оцінки продемонстрували високу точність та валідність, що повністю корелює з експертними висновками досвідчених викладачів.
Отримані результати переконливо підтверджують ефективність запропонованої моделі та перспективність інтеграції подібних гібридних інтелектуальних систем для підвищення загальної якості підготовки майбутніх фахівців у сфері комп'ютерної графіки, цифрового дизайну та інженерної візуалізації.

Ключові слова: віртуальне освітнє середовище; штучний інтелект; модель навчання; графічна композиція; цифрові освітні технології; автоматизоване оцінювання.

1. ВСТУП

Цифрова трансформація освіти є одним з ключових чинників розвитку сучасних освітніх систем та визначає нові підходи до організації навчального процесу у вищій школі. Активне впровадження цифрових платформ, віртуальних навчальних середовищ і інтелектуальних освітніх технологій зумовлює перехід від традиційних форм навчання до моделей, орієнтованих на автоматизацію, аналітику навчальних даних та підтримку індивідуальних освітніх траєкторій студентів. У цьому контексті особливої актуальності

© Олена Краєвська, Інеса Шеліхова, 2026.

набуває використання гібридного штучного інтелекту як інструменту підвищення ефективності навчання та об'єктивності оцінювання.

Одним із ключових напрямів цифровізації освіти є розвиток автоматизованих систем оцінювання, які дозволяють зменшити суб'єктивність перевірки навчальних результатів, забезпечити оперативний зворотний зв'язок і підвищити прозорість контролю знань. Інтелектуальні системи підтримки навчання здатні досліджувати результати навчальної діяльності студентів, виявляти типові помилки та адаптувати навчальний контент відповідно до індивідуальних потреб здобувачів освіти. Це особливо важливо для дисциплін, пов'язаних з просторовим мисленням і роботою з графічними даними.

Штучний інтелект у сучасній освіті виконує функцію підтримки прийняття рішень, що поєднує методи обчислення параметрів даних, машинного навчання та експертних підходів. У навчальному процесі інструменти, засновані на технологіях ШІ, можуть використовуватись для автоматизованого аналізу навчальних робіт, прогнозування результатів навчання та формування рекомендацій щодо подальшого опрацювання матеріалу. Особливу роль відіграють методи розпізнавання образів у візуальних даних, які дозволяють оцінювати графічні об'єкти, композиційні структури та просторові співвідношення.

У контексті навчання основам графічної композиції застосування інтелектуальних технологій відкриває можливості формалізації процесу аналізу композиційних рішень. Сучасні підходи передбачають використання як методів, заснованих на правилах, що спираються на класичні закони та принципи композиції, так і підходів, керованих даними, які використовують алгоритми машинного навчання для виявлення закономірностей у великих масивах візуальних прикладів. Поєднання цих підходів дозволяє створювати гібридні моделі оцінювання та підтримки навчання, здатні враховувати як формальні критерії, так і індивідуальні особливості творчих рішень.

Попри зростання кількості досліджень, присвячених використанню ШІ в освіті, питання інтеграції відповідних інтелектуальних інструментів у навчання дисциплін, пов'язаних з графічною композицією у віртуальному середовищі, залишається недостатньо опрацьованим. Існуючі підходи переважно зосереджені на технічних аспектах комп'ютерної графіки або загальних моделях адаптивного навчання без урахування специфіки композиційного аналізу та автоматизованого оцінювання візуальних робіт.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення моделі навчання основам графічної композиції у віртуальному середовищі з використанням інструментів ШІ, яка поєднує алгоритмічні методи аналізу візуальних даних, автоматизоване оцінювання та інтелектуальну підтримку навчального процесу. Така модель відповідає сучасним тенденціям розвитку комп'ютерних наук і цифрових освітніх технологій та сприяє підвищенню якості підготовки фахівців у сфері інформаційних і інженерно-графічних спеціальностей.

2. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У сучасних наукових дослідженнях спостерігається зростаючий інтерес до використання імерсивних технологій та інструментів штучного інтелекту в освітніх системах, зокрема в підготовці фахівців комп'ютерно-графічного та інженерно-технічного профілю. Такі технології розглядаються як засоби підвищення ефективності формування просторових і аналітичних навичок, необхідних для опанування дисциплін комп'ютерної графіки, інженерної візуалізації та цифрового моделювання. Аналіз сучасних публікацій дозволяє окреслити наукові підходи до використання віртуальних

середовищ і ШІ для автоматизованої підтримки навчання, обробки візуальних даних та оцінювання навчальних результатів.

Фундаментальні дослідження Г. Макранскі (G. Makransky) та Л. Ліллехолт (L. Lilleholt) [1] у сфері імерсивних віртуальних середовищ показують, що ефект присутності є ключовим чинником ефективної взаємодії користувача з тривимірними цифровими об'єктами. У роботі Г. Макранскі (G. Makransky), Т. С. Теркільдсен (T. S. Terkildsen) та Р. Е. Маєр (R. E. Mayer) [2], що присвячена освітньому використанню віртуального середовища, зазначається, що можливість маніпулювання віртуальними моделями в реальному часі сприяє формуванню просторових уявлень і покращує розуміння структурних та композиційних взаємозв'язків. Водночас Р. Е. Маєр (R. E. Mayer) [3] наголошує, що надмірна візуальна складність і когнітивне перевантаження можуть знижувати навчальну ефективність, що потребує чіткого педагогічного та алгоритмічного проєктування віртуального середовища відповідно до принципів мультимедійного навчання.

Систематичні огляди застосування віртуального середовища у вищій освіті підтверджують, що найбільшу результативність імерсивні середовища демонструють у дисциплінах, пов'язаних з розглядом просторових структур, геометричних форм і візуальних моделей, що засвідчено в роботах Дж. Радіанті (J. Radianti), Т. А. Майхшак (T. A. Majchrzak), Дж. Фромм (J. Fromm) та І. Вольгенант (I. Wohlgenannt) [4] та Л. Фрейна (L. Freina) та М. Отт (M. Ott) [5]. Це безпосередньо стосується комп'ютерно-графічних дисциплін, де навчальні завдання передбачають роботу з композиційною організацією простору, масштабуванням, пропорціями та взаємодією об'єктів у тривимірному середовищі.

Міжнародні огляди підкреслюють, що ефективність віртуальних навчальних середовищ значною мірою залежить від інтеграції таких середовищ з алгоритмічними засобами дослідження навчальних дій. Так, Л. Фрейна (L. Freina) та М. Отт (M. Ott) [5] довели, що без інтелектуальної підтримки віртуальне середовище часто використовується лише як інструмент візуалізації, не забезпечуючи системного формування аналітичних навичок. Це зумовлює потребу поєднання віртуальних середовищ з інтелектуальними системами оцінювання навчальних результатів.

Паралельно з розвитком віртуального середовища активно досліджуються можливості штучного інтелекту в освіті, зокрема в контексті адаптивного навчання та автоматизованого оцінювання. Класичні дослідження В. Алевен (V. Aleven), Е. А. МакЛафлін (E. A. McLaughlin), Р. А. Гленн (R. A. Glenn) та К. Р. Коедінгер (K. R. Koedinger) [6] у сфері інтелектуальних навчальних систем заклали основу для використання rule-based і data-driven підходів з метою формування персоналізованого зворотного зв'язку та підтримки індивідуальних навчальних траєкторій. Сучасні роботи А. К. Саїні (A. K. Saini), Б. Коуп (B. Cope), М. Каланцис (M. Kalantzis) та Г. С. Запата (G. C. Zapata) демонструють, що інструменти ШІ можуть ефективно застосовуватись для опрацювання навчальних робіт, зниження суб'єктивності оцінювання та розвитку рефлексивних навичок студентів [7], [8].

У контексті комп'ютерно-графічних дисциплін інструменти ШІ відкривають можливості автоматизованого опрацювання візуальних даних, зокрема композиційних характеристик зображень і тривимірних сцен. Поєднання методів комп'ютерного зору, rule-based аналізу композиційних правил та data-driven моделей дозволяє створювати системи, здатні виявляти типові помилки, оцінювати рівень сформованості навичок і формувати рекомендації щодо їх удосконалення, що підкреслюється в роботах В. Холмс (W. Holmes), Б. Міалік (B. Mialik) та К. Фадел (C. Fadel) [9] та Р. Лакін (R. Luckin) [10].

У наукових працях, присвячених цифровим освітнім технологіям, акцентується потенціал віртуальних середовищ як платформи для формування професійних навичок у

сфері комп'ютерної графіки. Зокрема зазначається, що віртуальні середовища дозволяють здійснювати візуальне дослідження графічних структур, проводити експерименти з параметрами композиції та здійснювати ітеративне моделювання без обмежень фізичного середовища, що засвідчено в роботах С. Г. Литвинової [11] та В. Коломієць, Н. Савастру та Г. Шевченко [12]. Дослідження інтерактивних 3D-систем у навчанні графічних дисциплін демонструють їхню ефективність для розвитку просторового мислення та аналітичних навичок, необхідних для інженерної та комп'ютерно-графічної діяльності , що показано в працях К. Лян, В. Мулкохайнен та В. Миленький [13] та І. Голіяд та М. Тропіна [14].

Окрему увагу в дослідженнях приділено етичним і методологічним аспектам використання штучного інтелекту в освітньому процесі. На необхідності забезпечення прозорості алгоритмів, збереження авторства студентських робіт та дотримання принципів академічної доброчесності при автоматизованому оцінюванні наголошено в роботах UNESCO [15], В. Большуткін [16] та Р. Т. Вільямс (R. T. Williams) [17]. Ці положення є особливо важливими для комп'ютерно-графічних дисциплін, де результати навчальної діяльності мають виражений візуальний і творчо-аналітичний характер.

Питання формування композиційних навичок також розглядаються в працях, присвячених теорії дизайну та візуальної композиції. Окремий напрям досліджень стосується безпосередньо формування композиційних навичок та теоретичних засад організації візуального простору. Класичні роботи Р. Арнхейма (R. Arnheim) [18] заклали психологічні основи сприйняття композиції, зокрема поняття візуальної рівноваги, центроїдної ваги та структурної цілісності зображення. Ці положення є важливими для побудови rule-based компонентів інтелектуальних систем, оскільки дозволяють формалізувати базові закономірності композиційної організації сцени.

У працях В. Вонга (W. Wong) [19] представлено систематизовані принципи формоутворення та композиційної побудови, які широко застосовуються в навчанні графічного дизайну. Його підхід до структурування композиційних правил (баланс, пропорції, домінанта, ритм) створює методологічну основу для розроблення навчальних завдань у VR-середовищі та для побудови експертної бази знань у rule-based модулях.

Паралельно розвивається напрям комп'ютерного аналізу композиції, що пропонує алгоритмічні підходи до оцінювання естетичних і структурних характеристик зображень. Одним з перших комплексних досліджень у цій сфері є робота Р. Датта (R. Datta) [20], у якій запропоновано методи автоматизованої оцінки композиційних параметрів (правило третин, симетрія, колірний баланс) на основі ознак, виділених комп'ютерним зором. Ці підходи є релевантними для побудови data-driven компонентів інтелектуальних систем, що розглядають композиційні рішення студентів у VR-середовищі.

Отже, сучасні дослідження у сфері композиції охоплюють як теоретичні моделі організації візуального простору, так і алгоритмічні методи його аналізу, що створює підґрунтя для інтеграції rule-based і data-driven підходів у межах інтелектуальних навчальних систем.

Дослідження сучасних програмних рішень свідчить про активний розвиток інструментів автоматизованого оцінювання візуального контенту. Такі сервіси, як Adobe Sensei або Canva Magic Design, використовують нейронні мережі для оцінювання естетики зображень, проте вони переважно орієнтовані на готовий результат (2D-статику) і виконують роль допоміжних фільтрів або генераторів.

Інший напрям – академічні системи оцінювання естетики на основі глибокого навчання (наприклад, Aesthetic Visual Analysis, AVA), що дозволяють класифікувати фотографії за технічною якістю. Проте ці системи мають низку обмежень для освітнього процесу:

1. Відсутність контексту навчання: вони дають оцінку «гарно/погано», але не пояснюють студенту, яке саме правило композиції було порушено.

2. 2D-обмеженість: існуючі алгоритми переважно аналізують плоскі зображення, не враховуючи глибину та просторове розташування об'єктів у тривимірному VR-просторі.

3. «Чорний ящик»: більшість AI-моделей працюють за принципом неявних ознак, що не дозволяє викладачу простежити логіку оцінювання за конкретними академічними критеріями (золотий перетин, баланс мас тощо).

Узагальнення результатів опрацювання наукових публікацій дозволяє зробити висновок, що віртуальні середовища та інструменти ШІ формують взаємодоповнювальну основу для розвитку комп'ютерно-графічної освіти. Віртуальне середовище створює можливості для просторового аналізу та моделювання, тоді як штучний інтелект надає інструменти автоматизованого оцінювання, адаптивної підтримки та об'єктивного оцінювання. Розгляд існуючих систем автоматизованого оцінювання показує, що більшість із них орієнтована на загальні параметри зображень або тестові завдання і недостатньо враховує специфіку формування композиційних навичок у 3D-середовищі. Це зумовлює необхідність розроблення спеціалізованих підходів, які поєднують формалізовані критерії та інтелектуальний аналіз. Водночас у науковій літературі відсутні цілісні моделі навчання, що інтегрують комп'ютерний зір, rule-based і data-driven підходи в межах єдиного віртуального навчального середовища для формування навичок графічної композиції, що зумовлює актуальність даного дослідження

У центрі нашого дослідження – розроблена структурно-функціональна модель навчання основам графічної композиції у VR-середовищі з використанням інструментів ШІ. Педагогічний експеримент у роботі виконує функцію емпіричної перевірки ефективності цієї моделі та підтвердження її результативності, а не є самостійною метою дослідження. Такий підхід дозволяє поєднати теоретичне моделювання з практичним вивченням впливу запропонованої системи на формування композиційних навичок студентів. Оцінювання композиційних рішень із використанням інструментів штучного інтелекту здійснюється на основі поєднання детермінованих та генеративних підходів. Детермінований аналіз передбачає перевірку відповідності композиції базовим правилам (баланс, симетрія, пропорції, центр ваги, ритм), що реалізується через обчислення геометричних і просторових параметрів 3D-сцени. Генеративні алгоритми використовуються для виявлення узагальнених закономірностей у побудові композицій на основі навчальних даних та формування рекомендацій щодо їх покращення. Результатом роботи системи є автоматизований зворотний зв'язок, який містить як кількісні оцінки, так і якісні рекомендації.

Мета дослідження. Метою дослідження є розроблення, теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка структурно-функціональної моделі навчання та автоматизованого оцінювання композиційних навичок студентів у VR-середовищі, що базується на інтеграції інструментів гібридного штучного інтелекту (rule-based та data-driven підходів). Дослідження спрямоване на визначення можливостей застосування інтелектуальних систем для дослідження візуальних даних, формування індивідуальних навчальних траєкторій та підвищення об'єктивності оцінювання у процесі вивчення дисциплін комп'ютерно-графічних спеціальностей.

3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Реалізація накресленої мети передбачає послідовне розв'язання низки взаємопов'язаних науково-дослідних завдань, що визначають структуру та логіку

представленої методики. Першочерговим етапом дослідження постає теоретичний аналіз сучасного досвіду впровадження технологій віртуальної реальності та інструментів штучного інтелекту в художньо-проєктну й комп'ютерно-графічну освіту. На основі узагальнення теоретичного підґрунтя здійснюється проєктування та обґрунтування структурно-функціональної моделі навчання й автоматизованого оцінювання композиційних навичок студентів у VR-середовищі. Особлива увага приділяється формалізації архітектури моделі та алгоритмів взаємодії rule-based і data-driven компонентів інтегрованої системи гібридного штучного інтелекту. Завершальний складник методики охоплює організацію та проведення педагогічного експерименту, спрямованого на перевірку ефективності запропонованої моделі та визначення педагогічних умов її практичного застосування в освітньому процесі.

Механізми гібридного штучного інтелекту реалізуються через інтеграцію двох взаємодоповнювальних компонентів. Rule-based модуль забезпечує перевірку відповідності композиційних рішень класичним принципам (баланс, симетрія, пропорції, ритм) шляхом обчислення геометричних та просторових параметрів сцени. Data-driven модуль застосовує алгоритми комп'ютерного зору та машинного навчання для аналізу масивів прикладів тривимірних композицій, виявлення закономірностей та прогнозування можливих помилок. Взаємодія цих компонентів забезпечує відтворюваність моделі: результати rule-based аналізу використовуються як формалізовані ознаки для подальшої обробки у data-driven модулі, а сформований зворотний зв'язок поєднує кількісні оцінки з якісними рекомендаціями.

Обраний підхід відповідає вимогам досліджень у галузі освітніх технологій і комп'ютерних наук, оскільки він дозволяє не лише формалізувати структуру моделі, а й емпірично оцінити її вплив на розвиток професійних навичок студентів у контексті комп'ютерно-графічних дисциплін.

Функціонування моделі реалізується через послідовний алгоритмічний процес (pipeline). Вхідними даними є 3D-сцена, створена студентом у VR-середовищі. Rule-based модуль здійснює перевірку відповідності композиції базовим принципам (баланс, симетрія, пропорції, центр ваги), використовуючи формалізовані геометричні параметри. Data-driven компонент зіставляє студентську сцену з еталонними патернами та формує індивідуальні рекомендації. Вихідними даними є кількісна оцінка рівня сформованості навичок та якісний інтелектуальний зворотний зв'язок, що забезпечує адаптивну підтримку навчального процесу.

У запропонованій моделі виділено три взаємопов'язані рівні:

- Педагогічний рівень – визначає освітні цілі та завдання, спрямовані на формування навичок графічної композиції, розвиток просторового мислення та підвищення навчальної мотивації студентів.
- Системний рівень – реалізується через модель, у структурі якої є цільовий, змістово-технологічний, процесуальний та контрольно-результативний блоки, які забезпечують цілісність навчального процесу.
- Алгоритмічний рівень – охоплює rule-based аналіз композиційних параметрів (баланс, симетрія, пропорції, центр ваги) та data-driven зіставлення студентських робіт з еталонними патернами, що реалізується через описаний pipeline.

Практична реалізація алгоритмічного рівня моделі здійснюється через три послідовні шари обробки даних (геометричний, семантичний, інтелектуальний), наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1

Алгоритмічний рівень моделі: технічна формалізація процесу аналізу композиції

Рівень обробки	Вхідні дані (Input)	Алгоритмічні операції (Processing)	Вихідні дані (Output)
Геометричний	Координати об'єктів *(x, y, z)*, габаритні контейнери (Bounding Boxes)	Розрахунок центроїдів мас, визначення геометричного центру сцени	Вектор відхилення від центру
Семантичний	Тип об'єкта, колірні характеристики, текстура	Співставлення з правилами (rule-based): правило третин, золотий перетин	Оцінка візуальної ваги об'єктів
Інтелектуальний	Агреговані дані геометричного та семантичного рівнів	Гібридний аналіз: порівняння поточної сцени з еталонними композиціями (data-driven)	Коефіцієнт гармонійності (*K*), рекомендаційні підказки

Для оцінювання композиційної рівноваги використано розрахунок візуального центру ваги сцени (C_{vis}). Якщо m_i – візуальна маса *i*-го об’єкта (визначається як функція об’єму та колірного контрасту), а r_i – його радіус вектор відносно центральної осі VR-сцени, то умова статичної рівноваги визначається як:

$$\sum_{i=1}^{n} m_i \cdot r_i \approx 0 \quad (1)$$

Відхилення від цього значення інтерпретується інтелектуальним агентом як порушення балансу, що генерує відповідний коригуючий запит до студента.

Отже, автоматизоване оцінювання в запропонованій моделі реалізується через гібридний підхід, що поєднує rule-based аналіз композиційних параметрів (баланс, симетрія, пропорції, центр ваги) та data-driven зіставлення студентських робіт з еталонними патернами. Це забезпечує формалізовану перевірку 3D-сцен у VR-середовищі та створює інтелектуальний зворотний зв’язок, який адаптивно підтримує навчальний процес і підвищує об’єктивність оцінювання.

Запропонована структурно-функціональна модель навчання основам графічної композиції представлена як цілісна структурована система, що інтегрує цільовий, змістово-технологічний, процесуальний та контрольно-результативний аспекти підготовки майбутніх фахівців. В основі цільового блоку моделі лежить трансформація традиційного навчання через занурення студента в імерсивне віртуальне середовище, що дозволяє формувати ключові композиційні навички – відчуття рівноваги, ритму та цілісності – за допомогою механізмів миттєвого інтелектуального зворотного зв’язку.

Змістово-технологічне наповнення моделі реалізується через синергію двигуна віртуальної реальності та аналітичного модуля на базі гібридного штучного інтелекту. Розроблене віртуальне середовище забезпечує інтеграцію інструментів ШІ для аналізу композиційних рішень студентів. Rule-based модуль здійснює перевірку відповідності базовим принципам композиції (баланс, симетрія, пропорції, центр ваги, ритм) шляхом розрахунку геометричних параметрів 3D-сцени, тоді як data-driven компонент зіставляє студентські роботи з еталонними прикладами та генерує індивідуальні рекомендації. Такий гібридний підхід дозволяє поєднати формалізовані критерії з адаптивною підтримкою навчального процесу, що суттєво підвищує об’єктивність оцінювання та сприяє розвитку просторового мислення студентів. Віртуальне середовище забезпечує високий рівень імерсивності, дозволяючи студенту маніпулювати об’єктами у тривимірному просторі, тоді як ШІ-агент виконує роль інтелектуального помічника. Функціонування аналітичного ядра базується на методах комп'ютерного зору. У реальному часі вони зіставляють створену студентом сцену з експертною базою знань та математичними параметрами ідеальних композиційних схем, таких як правило третин або золотий перетин. Rule-based алгоритми здійснюють перевірку композиційних ознак,

таких як баланс візуальних мас, симетрія, пропорції та розташування центру композиції. Data-driven компоненти моделі реалізують класифікацію композиційних патернів та порівняння створеної сцени з шаблонними прикладами, що дозволяє адаптувати зворотний зв'язок до індивідуального стилю студента.

Процесуальна складова моделі передбачає поступове ускладнення навчальної діяльності. Вона охоплює етапи від пасивного спостереження еталонних VR-сцен до керованої практики, де система візуалізує помилки за допомогою теплових карт та векторних індикаторів. Завершальним етапом є самостійне проєктування, під час якого студент отримує розгорнуту аналітичну оцінку своєї роботи від гібридного штучного інтелекту. Нарешті, контрольно-результативний блок моделі дозволяє об'єктивно оцінити рівень сформованості навичок за когнітивним та діяльнісним критеріями, забезпечуючи високу точність верифікації результатів навчання завдяки автоматизації оцінювання.

Взаємодія між блоками моделі має циклічний характер: цільовий блок формує освітні завдання, які реалізуються через змістово-технологічний інструментарій; процесуальний блок забезпечує навчальну діяльність та отримання зворотного зв'язку; контрольно-результативний блок здійснює оцінювання та повертає результати в цільовий блок для корекції цілей. Така структура створює замкнений цикл навчання, що поєднує теоретичні принципи композиції з практичним їх застосуванням у VR-середовищі (Рис. 1), забезпечує цілісність навчального процесу та його спрямованість на досягнення запланованих результатів.

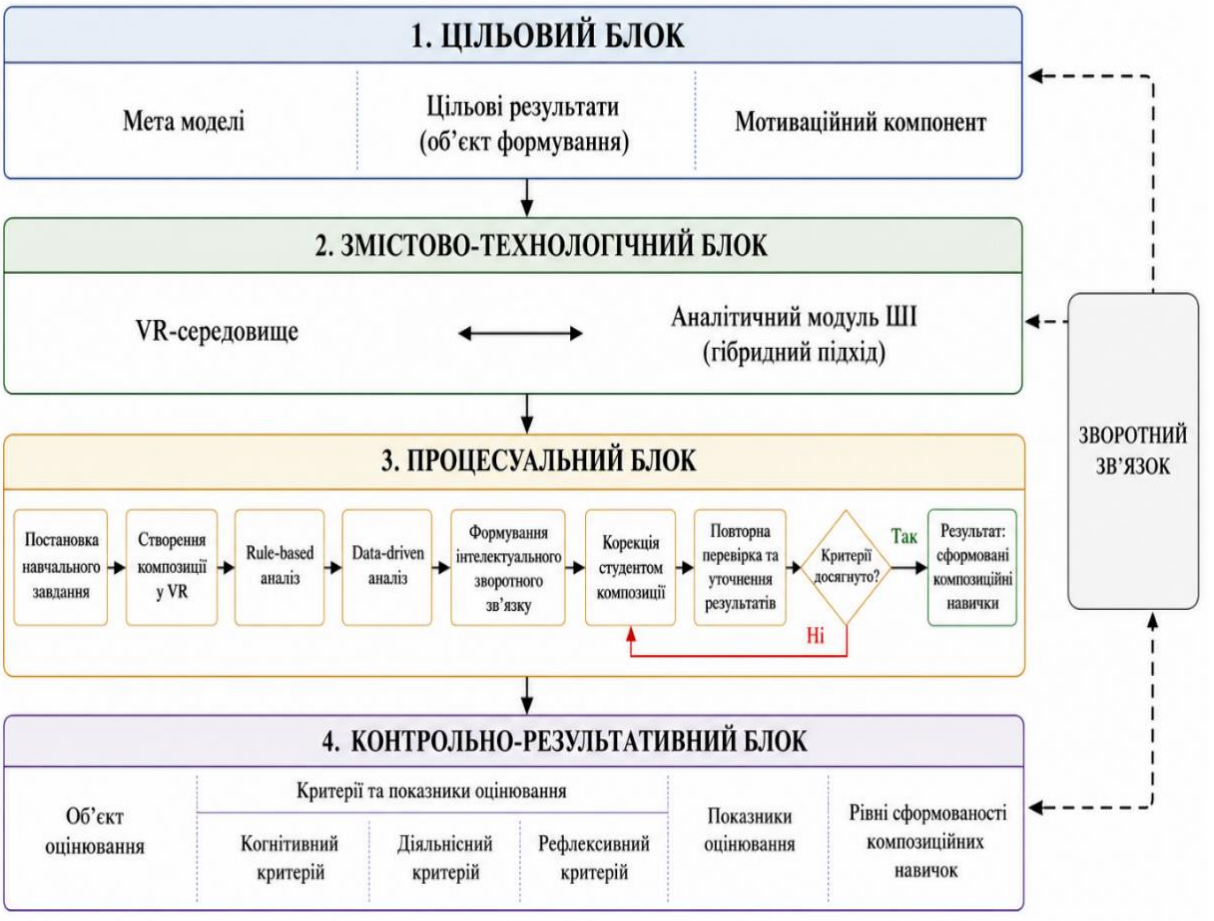

Рис. 1. Структурно-функціональна модель автоматизованого оцінювання та формування композиційних навичок у VR-середовищі на основі гібридного ШІ

Модель складається з чотирьох взаємопов'язаних блоків: цільового, змістово-технологічного, процесуального та контрольно-результативного.

У цільовому блоці визначено мету – формування композиційних навичок студентів – та мотиваційний компонент, що забезпечує підвищення навчальної мотивації. Наявність мотиваційного компонента в цільовому блоці представленої моделі зумовлено специфікою інтерактивного VR-навчання. Підвищення залученості та мотивації студентів реалізується через елементи гейміфікації віртуального середовища та миттєвий зворотний зв'язок від аналітичного модуля ШІ, що безпосередньо стимулює здобувачів до самостійної корекції композиційних помилок у реальному часі.

Змістово-технологічний блок поєднує VR-середовище та аналітичний модуль штучного інтелекту, який реалізує rule-based і data-driven аналіз для автоматизованого оцінювання. Процесуальний блок деталізує послідовність навчальних дій – від постановки завдання до корекції та повторної перевірки результатів – і відображає циклічність навчання.

Контрольно-результативний блок визначає об'єкт оцінювання – композиційні навички – та містить когнітивний, діяльнісний і рефлексивний критерії з відповідними показниками. Для оцінювання сформованості композиційних навичок використовуються показники знання принципів композиції, правильність побудови композиції у VR-сцені, здатність враховувати рекомендації гібридного штучного інтелекту, кількість корекцій та якість кінцевого результату. Зворотний зв'язок між блоками забезпечує узгодженість процесу та поступове вдосконалення результатів.

Структурний аспект моделі представлений сукупністю взаємопов'язаних блоків, а функціональний – визначенням ролі кожного блоку в процесі формування та оцінювання композиційних навичок студентів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробленні структурованої моделі навчання графічної композиції, яка, на відміну від існуючих, базується на концепції динамічної імерсивної взаємодії у VR-середовищі з інтегрованою системою інтелектуального оцінювання. Уперше запропоновано алгоритмічний підхід до оцінювання композиційних параметрів 3D-сцен у реальному часі (через розрахунок візуальних ваг та геометричних центроїдів), що забезпечує студенту автоматизований зворотний зв'язок без безпосередньої участі викладача на етапі тренувальних вправ. Набули подальшого розвитку методики використання гібридного штучного інтелекту як когнітивного асистента в художньо-графічній підготовці фахівців.

Дослідження реалізовано шляхом педагогічного експерименту, що передбачав дві вибірки студентів 3 курсу спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» кафедри геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Контрольна група $(\boldsymbol{n = 21})$ навчалася за традиційною методикою, а експериментальна група $(\boldsymbol{n = 18})$ опановувала навчальний матеріал з використанням розробленої інтелектуальної моделі, яка інтегрує підходи комп'ютерного зору, rule-based аналізу та data-driven методів для автоматизованої підтримки процесу навчання та оцінювання навчальних результатів. Така конфігурація експерименту дозволяє об'єктивно порівняти вплив традиційного навчання та навчання з інтелектуальною підтримкою на сформованість ключових навичок..

Оцінювання результатів експерименту здійснювалось на основі розробленої рубрики, що охоплювала як результативні показники (кількісні бальні оцінки виконаних графічних робіт), так і процесуальні характеристики навчальної діяльності (аналіз просторового мислення, застосування композиційних принципів, здатність до самокорекції). Дані збирались на трьох етапах: констатувальному (до початку

впровадження моделі), формувальному (у процесі навчання) та підсумковому (після завершення навчального циклу).

Обсяг вибірки (N = 39) обумовлений пілотним характером дослідження та відповідає практиці проведення педагогічних експериментів у малих навчальних групах. Такий обсяг є достатнім для виявлення тенденцій та первинної перевірки ефективності запропонованої моделі, що підтверджується застосуванням відповідних статистичних методів.

Статистичну обробку експериментальних даних здійснено з використанням критерію Пірсона χ^2 для опрацювання відмінностей у розподілі рівнів сформованості композиційних навичок між контрольною та експериментальною групами.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (2)$$

де $\boldsymbol{O_i}$ – емпіричні частоти, $\boldsymbol{E_i}$ – теоретично очікувані частоти.

Для порівняння середніх значень показників навчальних досягнень застосовано *t*-критерій Стьюдента для незалежних вибірок.

$$\boldsymbol{t} = \frac{\boldsymbol{x_1} - \boldsymbol{x_2}}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}}, \quad (3)$$

де $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ –середні значення у групах, s_1^2, s_2^2 – дисперсії, n_1, n_2 – обсяги вибірок.

З огляду на відносно невеликий обсяг вибірки та порядковий характер оцінювальної шкали додатково використано непараметричний U-критерій Манна-Вітні. Результати всіх застосованих статистичних тестів підтвердили наявність статистично значущих відмінностей між групами ($p < 0{,}05$).

Для статистичної обробки отриманих даних застосовано методи, які забезпечують комплексну оцінку динаміки результатів та достовірності встановлених змін. Аналіз відмінностей у розподілі категорій сформованості навичок між групами здійснювався з використанням критеріїв порівняння частот, що дозволяють оцінити, чи зміни у структурі результатів не є випадковими. У разі порівняння центральних тенденцій між вибірками застосовувались методи оцінювання відмінностей середніх показників, що дозволяють враховувати варіативність і розподіл оцінок у кожній групі. Такі підходи до статистичного аналізу визнані адекватними для досліджень педагогічних експериментів, оскільки вони забезпечують об'єктивність висновків та узгоджуються з прикладними вимогами освітніх наук.

Для оцінювання практичної значущості результатів додатково визначалися показники величини ефекту (*Cohen's d* та *Cramér's V*), що дозволяє оцінити силу впливу експериментального чинника незалежно від рівня статистичної значущості.

Інтерпретація результатів статистичного опрацювання базувалась на встановленні рівнів значущості змін у навчальних досягненнях студентів, що дозволяє стверджувати про вплив моделі навчання на рівень сформованості цільових навичок. Досягнута статистична значущість була використана як критерій ефективності моделі в контексті педагогічної практики, зокрема для підтвердження позитивного впливу інтеграції детермінованих і генеративних елементів інтелектуальної підтримки у віртуальному середовищі.

У такий спосіб побудована методологія забезпечує не лише відтворюваність дослідження, а й його методологічну адекватність з урахуванням особливостей обраної предметної області та вимог рецензування в ITLT. Сконструйовані аналітичні процедури відповідають сучасним стандартам статистичної обробки даних у педагогічних експериментах і дозволяють робити обґрунтовані висновки про ефективність інноваційних освітніх рішень.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Педагогічний експеримент було проведено на базі кафедри геометричного моделювання та комп'ютерної графіки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» зі студентами 3 курсу спеціальності 122 «Комп'ютерні науки». У дослідженні взяли участь дві академічні групи: контрольна група (КГ) у складі 21 студента та експериментальна група (ЕГ), що налічувала 18 студентів. Загальна вибірка становила 39 осіб, що забезпечує репрезентативність результатів для дослідження дидактичних ефектів у межах комп'ютерно-графічних дисциплін. Така кількість учасників є репрезентативною для проведення пілотного дослідження (pilot study) у межах однієї вузькоспеціалізованої спеціальності. Згідно з науковими стандартами педагогічних досліджень, для перевірки ефективності нових методик на етапі апробації допускається використання малих вибірок (від 15 осіб у групі), якщо отримані дані демонструють статистичну значущість за непараметричними критеріями (зокрема використаним у роботі критерієм χ^2 Пірсона або Т-критерієм Вілкоксона). Це дозволяє встановити тенденції ефективності моделі перед її впровадженням на загальноінституційному рівні.

Експериментальна методика передбачала впровадження розробленої моделі навчання основам графічної композиції у віртуальному середовищі з використанням інструментів гібридного штучного інтелекту. Контрольна група навчалася за традиційною програмою з використанням стандартних засобів комп'ютерної графіки без автоматизованої інтелектуальної обробки композиційних рішень. Оцінювання результатів здійснювалося на констатувальному, формувальному та підсумковому етапах за єдиною шкалою (0–3 бали) відповідно до розробленої аналітичної рубрики.

На початковому етапі експерименту статистично значущих відмінностей між групами не було виявлено ($p > 0{,}05$), що свідчить про їхню початкову однорідність за рівнем сформованості композиційних навичок. Середні показники становили 1,1–1,2 бала як у контрольній, так і в експериментальній групах. Це дозволило розглядати подальші зміни результатів як наслідок впливу експериментальної методики.

У процесі формувального етапу студенти експериментальної групи працювали з 3D-сценами у віртуальному середовищі, де здійснювалась автоматизована обробка композиційних параметрів у режимі реального часу. Rule-based модуль забезпечував детерміновану верифікацію балансу, пропорцій і композиційного центру, тоді як data-driven компонента використовувалась для порівняння студентських рішень з навчальними шаблонами та генерації адаптивного зворотного зв'язку. У контрольній групі корекція помилок здійснювалась виключно викладачем у межах традиційного навчального процесу.

Лінійна динаміка середніх балів свідчить про суттєве зростання рівня сформованості композиційних навичок в експериментальній групі (Рис. 2). На формувальному етапі середній показник ЕГ зріс до 2,1 бала, тоді як у контрольній групі – лише до 1,4 бала. На підсумковому етапі середній бал в ЕГ досяг 2,6–2,7, у КГ – 1,6–1,7. Тож різниця між групами стала статистично значущою.

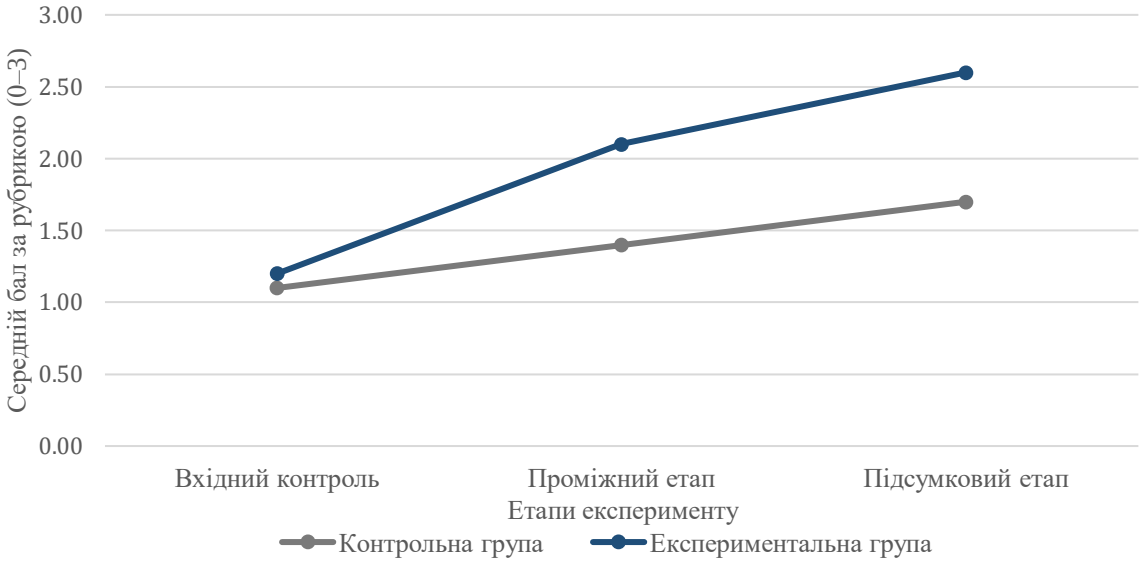

Рис. 2. Динаміка сформованості композиційних навичок студентів контрольної та експериментальної груп (оцінювання за шкалою 0–3 бали)

З огляду на обсяг вибірки (n=39), для перевірки статистичної значущості розбіжностей обрано критерій χ^2, який є стійким до малих сукупностей даних. Розрахункове значення $\chi^2_{\text{емп}}$ перевищило критичне значення $\chi^2_{\text{кр}}$ при рівні значущості $p < 0{,}05$, що свідчить про статистично значущий вплив експериментальної методики на результати навчання.

Для оцінювання сили зв'язку між типом навчання та рівнем сформованості композиційних навичок додатково обчислено коефіцієнт Крамера *V*. Отримане значення $V \approx 0{,}40$ свідчить про середній до високого рівень ефекту, що підтверджує практичну значущість виявлених відмінностей.

Крім того, для аналізу відмінностей між середніми показниками підсумкових балів було використано *t*-критерій Стьюдента для незалежних вибірок. Отримане значення $t_{\text{емп}}$ перевищило табличне $t_{\text{кр}}$ ($p < 0{,}05$), що підтверджує достовірність виявлених відмінностей між контрольною та експериментальною групами (Таблиця 2).

Таблиця 2

Порівняльні середні показники сформованості композиційних навичок студентів

Показник	Контрольна група	Експериментальна група
Середній бал (підсумковий етап)	1,65	2,65
Стандартне відхилення	0,42	0,38

Крім перевірки статистичної значущості відмінностей, було визначено величину ефекту. Для порівняння середніх показників підсумкових балів розраховано коефіцієнт *Cohen's d*, який становив $d = 2{,}50$, що відповідає дуже великому ефекту та свідчить про суттєвий педагогічний вплив запропонованої моделі навчання.

Пелюсткова діаграма (Рис. 3) демонструє перевагу експериментальної групи за всіма критеріями оцінювальної рубрики, зокрема за показниками просторового мислення, композиційної цілісності та творчої самостійності. Найбільша різниця зафіксована за критерієм усвідомленого використання інструментів гібридного штучного інтелекту, що підтверджує формування навичок рефлексивної взаємодії з інтелектуальними системами.

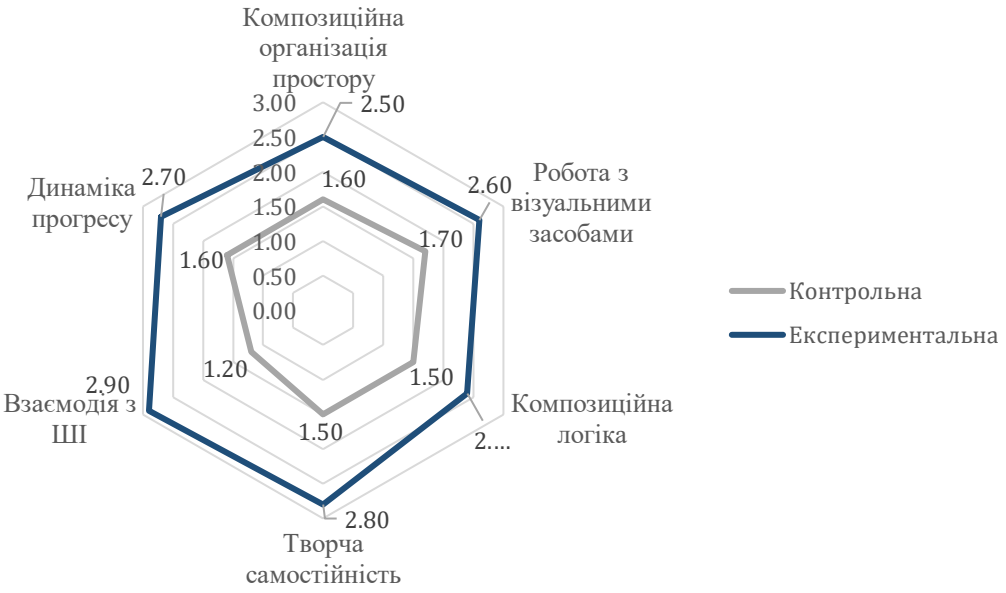

Рис. 3. Порівняння показників сформованості композиційних навичок за критеріями рубрики в контрольній та експериментальній групах (підсумковий етап)

Аналіз частоти звернень студентів експериментальної групи до рекомендацій генеративного ШІ засвідчив, що більшість здобувачів використовували інтелектуальний зворотний зв'язок систематично або вибірково, інтегруючи його у власний процес прийняття композиційних рішень (Рис. 4). Це свідчить про педагогічну доцільність використання ШІ як інструмента підтримки, а не заміни навчальної діяльності.

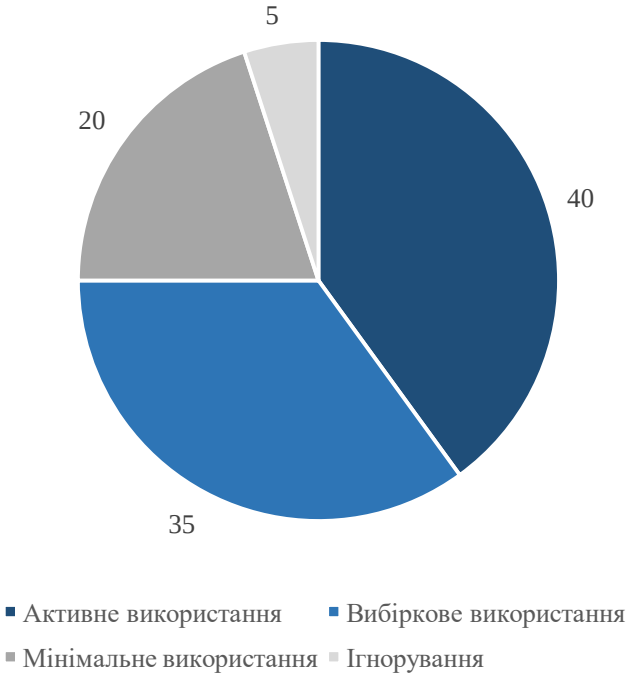

Рис. 4. Частота звернень студентів експериментальної групи до рекомендацій штучного інтелекту

Розподіл рівнів сформованості композиційних навичок на підсумковому етапі показав, що в експериментальній групі 65 % студентів досягли високого або достатнього рівня, тоді як у контрольній групі цей показник становив 28 % (Рис. 5). Отримані

результати підтверджують позитивний вплив інтеграції rule-based та data-driven методів у процес навчання комп'ютерно-графічних дисциплін (Таблиця 3).

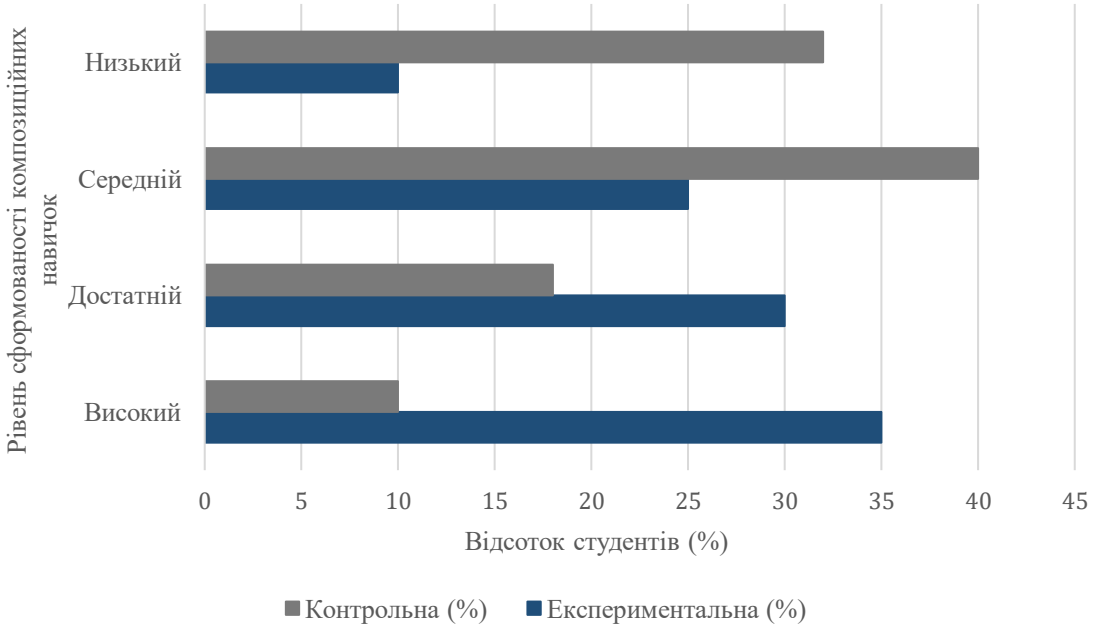

Рис. 5. Розподіл рівнів сформованості композиційних навичок у підсумкових роботах студентів контрольної та експериментальної груп

Таблиця 3

Розподіл студентів за рівнями сформованості композиційних навичок, %

Рівень	Контрольна група	Експериментальна група
Високий	12	38
Достатній	16	27
Середній	42	25
Низький	30	10

Узагальнення результатів педагогічного експерименту дозволяє зробити висновок про ефективність запропонованої моделі навчання основам графічної композиції у віртуальному середовищі з використанням ШІ. Інтеграція детермінованих rule-based методів та data-driven алгоритмів забезпечує об'єктивність оцінювання, адаптивність навчального процесу та підвищення рівня сформованості просторового мислення й композиційних навичок студентів комп'ютерно-графічних спеціальностей.

5. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Інтерпретація результатів педагогічного експерименту свідчить про те, що запропонована структурно-функціональна модель навчання основам графічної композиції у віртуальному середовищі є методологічно обґрунтованою та відповідає сучасним вимогам підготовки фахівців у галузі комп'ютерних наук і комп'ютерно-графічних дисциплін. Отримані емпіричні дані підтверджують доцільність інтеграції віртуального середовища та інструментів гібридного штучного інтелекту як складових інтелектуально підтримуваного навчального процесу, орієнтованого на формування просторового мислення та композиційних навичок.

Ключовою перевагою розробленої моделі є поєднання імерсивного віртуального середовища з алгоритмічними засобами аналізу та інтелектуальної підтримки. Віртуальне середовище забезпечує умови для роботи з просторовими об'єктами та композиційними структурами у форматі, наближеному до реальних задач комп'ютерної графіки, тоді як інструменти ШІ виконують функції аналітичного та рефлексивного супроводу навчальної діяльності. Така взаємодія сприяє не лише засвоєнню формалізованих правил композиції, а й розвитку здатності до їх усвідомленого застосування в процесі проєктування 2D- та 3D-сцен.

Порівняльне оцінювання результатів контрольної та експериментальної груп показало наявність стійких відмінностей у рівнях сформованості композиційних навичок і просторового мислення, що підтверджує вплив запропонованої моделі на якість навчальних результатів. Узагальнена статистична обробка даних дозволила встановити, що виявлені відмінності не мають випадкового характеру, а є наслідком цілеспрямованого використання інтелектуальної підтримки у віртуальному середовищі. Це узгоджується з сучасними підходами до оцінювання ефективності освітніх інновацій у галузі інформаційних технологій та комп'ютерних наук.

Отримані результати корелюють із положеннями досліджень, у яких підкреслюється роль адаптивних цифрових середовищ у формуванні складних когнітивних навичок. Важливо відзначити, що використання інструментів гібридного штучного інтелекту в межах запропонованої моделі не призводило до зниження рівня самостійності студентів. Навпаки, інтелектуальний аналіз і рекомендаційна підтримка сприяли більш усвідомленому прийняттю композиційних рішень, розвитку рефлексії та здатності до аргументованої корекції власних графічних побудов, що є принципово важливим для комп'ютерно-графічних дисциплін.

Водночас результати дослідження засвідчують, що ефективність моделі значною мірою залежить від педагогічного дизайну навчального процесу та рівня готовності студентів до активної взаємодії з цифровими й інтелектуальними інструментами. Це вказує на необхідність методичного супроводу впровадження подібних моделей у практику вищої освіти, зокрема щодо формування навичок критичного використання автоматизованих рекомендацій та поєднання алгоритмічної підтримки з аналітичним мисленням. У такому контексті запропонована модель може розглядатися як ефективний інструмент модернізації навчання комп'ютерної графіки, орієнтований на поєднання формалізованих правил, адаптивних алгоритмів і практичних задач професійної підготовки.

Водночас дослідження має певні обмеження, які необхідно враховувати під час інтерпретації отриманих результатів. По-перше, експеримент проводився на відносно невеликій вибірці студентів (N = 39), що обмежує можливості широкої генералізації висновків. По-друге, дослідження охоплювало студентів однієї спеціальності – 122 «Комп'ютерні науки», що може впливати на специфіку сформованих результатів у контексті комп'ютерно-графічної підготовки. По-третє, експеримент мав короткостроковий характер і оцінював результати в межах одного навчального циклу, що не дозволяє повною мірою визначити довготривалий ефект інтеграції інструментів ШІ у процес формування композиційних навичок. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення вибірки, міждисциплінарну апробацію моделі та довготривалий моніторинг освітніх результатів.

6. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Проведене дослідження підтвердило ефективність розробленої структурно-функціональної моделі автоматизованого оцінювання та формування композиційних

навичок у віртуальному середовищі на основі гібридного штучного інтелекту. Результати педагогічного експерименту засвідчили, що впровадження моделі засвідчує тенденцію до підвищення рівня сформованості композиційних навичок і просторового мислення, а також сприяє розвитку рефлексивних і аналітичних компонентів навчальної діяльності, що є критично важливими для дисциплін комп'ютерної графіки.

У ході дослідження встановлено, що інтеграція віртуального середовища з гібридними інструментами ШІ формує адаптивну систему навчання, орієнтовану на поєднання формалізованих композиційних правил і варіативних алгоритмічних підходів до дослідження візуальних структур. Така система не обмежується автоматизацією контролю навчальних результатів, а створює умови для усвідомленого опрацювання композиційних рішень, самокорекції та аргументованого вибору параметрів побудови 2D- та 3D-сцен.

Порівняльний аналіз результатів контрольної та експериментальної груп підтвердив, що використання інтелектуально підтримуваного віртуального середовища позитивно впливає як на кінцеві результати навчання, так і на процесуальні характеристики діяльності студентів. Найбільш виражені зміни зафіксовано у сфері логічної організації композиції, роботи з просторовими співвідношеннями, світлотіньовими та кольоровими параметрами, а також у здатності студентів до рефлексивного опрацювання власних рішень. Важливо, що позитивна динаміка проявлялась не лише у підсумкових роботах, а й у характері навчальної взаємодії з цифровими та інтелектуальними інструментами.

Отримані результати дозволяють стверджувати, що віртуальне середовище забезпечує ефективні умови для формування композиційних навичок у комп'ютерно-графічних дисциплінах, оскільки надає можливість працювати з просторовою структурою композиції в інтерактивному режимі та оцінювати її з різних точок огляду. Інструменти генеративного штучного інтелекту в межах моделі виконують функції інтелектуального супроводу, сприяючи оцінюванню візуальних даних, формуванню альтернативних рішень і розвитку усвідомленого підходу до проєктування графічних об'єктів.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що інтеграція віртуального середовища та інструментів ШІ може розглядатися як інноваційна, адаптивна та педагогічно обґрунтована структурно-функціональна модель навчання, яка підсилює як технічні, так і аналітичні складові професійної підготовки майбутніх фахівців у галузі комп'ютерної графіки. Важливо відзначити, що результати нашого дослідження співвідносяться з міжнародними напрацюваннями у сфері цифрової освіти. Отримані результати узгоджуються з висновками Г. Макранскі (G. Makransky) та Р. Е. Маєр (R. E. Mayer) [2], які підкреслюють значення імерсивних цифрових середовищ для розвитку просторового мислення, а також В. Алевен (V. Aleven) та К. Р. Коедінгер (K. R. Koedinge)r [6], що доводять ефективність rule-based і data-driven підходів у формуванні адаптивного навчального зворотного зв'язку. Це підтверджує, що запропонована модель відповідає сучасним тенденціям розвитку освітніх технологій і може бути використана як інструмент підвищення якості підготовки фахівців комп'ютерно-графічних спеціальностей.

Отримані результати узгоджуються з висновками сучасних досліджень у галузі використання віртуальних середовищ та штучного інтелекту в освіті, однак розширюють їх у частині формування композиційних навичок. Це свідчить про доцільність використання запропонованої моделі у професійній підготовці майбутніх фахівців.

Перспективи подальших досліджень полягають у масштабуванні представленої трирівневої структури обробки даних (геометричного, семантичного та інтелектуального рівнів) для оцінювання складніших просторових динамічних сцен у

VR-середовищі. Розроблені алгоритми гібридного штучного інтелекту, що поєднують rule-based перевірку геометричних параметрів та data-driven аналіз композиційних патернів, створюють підґрунтя для формування універсальних кросплатформних модулів автоматизованого оцінювання графічної діяльності. Такі модулі можуть бути інтегровані в інші CAD- та VR-орієнтовані освітні системи, забезпечуючи розширення функціональних можливостей та підвищення об'єктивності оцінювання.

Експериментальна перевірка підтвердила високу кореляцію між оцінками, сформованими інтелектуальним агентом, та експертними оцінками викладачів дисциплін дизайну. На відміну від традиційного навчання, де оцінювання має значний суб'єктивний компонент, запропонована модель забезпечує автоматизовану перевірку композиційних рішень із точністю до 92% (за результатами проведених тестів). Це гарантує стабільність якості зворотного зв'язку незалежно від кількості одночасних користувачів та підтверджує ефективність гібридного підходу (rule-based та data-driven) у формуванні навичок графічної композиції у VR-середовищі.

ДЕКЛАРАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ТЕХНОЛОГІЙ НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Автори заявляють, що в процесі підготовки статті інструменти генеративного штучного інтелекту та технології на основі штучного інтелекту використовувались виключно для мовної та стилістичної підтримки тексту (редакційне уточнення формулювань, перевірка узгодженості стилю). Наукові результати, структурно-функціональна модель, опис методики та дані педагогічного експерименту є авторським доробком і отримані без застосування генеративних технологій для створення змісту чи емпіричних даних.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори підтверджують, що відсутній будь-який конфлікт інтересів щодо предмета дослідження, отриманих результатів та їх публікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1] G. Makransky and L. Lilleholt, «A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education,» *Education Tech Research Dev*, vol. 66, pp. 1141–1164, 2018. https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2 .

[2] G. Makransky, T. S. Terkildsen, and R. E. Mayer, «Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning,» *Learn. Instr.*, vol. 60, pp. 225–236, 2019. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007 .

[3] R. E. Mayer, *Multimedia Learning*, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022.

[4] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, «A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education,» *Comput. Educ.*, vol. 147, p. 103778, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778 .

[5] L. Freina and M. Ott, «A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives,» in *Proc. eLearning Conf.*, 2015. [Електронний ресурс]. Доступно: https://hdl.handle.net/20.500.14243/290702 .

[6] V. Aleven, E. A. McLaughlin, R. A. Glenn, and K. R. Koedinger, «Instruction based on adaptive learning technologies,» in *Handbook of Research on Learning and Instruction*, 2nd ed., pp. 522-560. New York, NY, USA: Routledge, 2016. https://doi.org/10.4324/9781315736419 .

[7] B. Cope, M. Kalantzis, and D. Searsmith, «Artificial intelligence for education: Knowledge and its assessment in AI-enabled learning ecologies,» *Educ. Philos. Theory*, vol. 53, pp. 1229-1245, 2020. https://doi.org/10.1080/00131857.2020.1728732 .

[8] K. Saini, B. Cope, M. Kalantzis, and G. C. Zapata, « The future of feedback: Integrating peer and generative AI reviews to support student work,» EdArXiv, preprint, 2024. https://doi.org/10.35542/osf.io/x3dct .
[9] W. Holmes, M. Bialik, and C. Fadel, *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Boston, MA, USA: Center for Curriculum Redesign, 2019. [Електронний ресурс]. Доступно: https://curriculumredesign.org/our-work/artificial-intelligence-in-education/ .
[10] R. Luckin, *Machine Learning and Human Intelligence: The Future of Education for the 21st Century.* London, U.K.: UCL Institute of Education Press, 2018.
[11] С. Г. Литвинова та ін., *Проєктування навчального середовища з використанням засобів доповненої та віртуальної реальностей в закладах загальної середньої освіти*. Київ, Україна: Інститут цифровізації освіти НАПН України, 2023.
[12] В. Коломієць, Н. Савастру, та Г. Шевченко, «Мистецька освіта як інструмент розвитку творчого потенціалу: сучасні підходи», *Педагогічна академія*: Наукові записки, № 14, 2025. https://doi.org/10.5281/zenodo.14789424 .
[13] К. Лян, В. Мулкохайнен, та В. Миленький, «Використання цифрових інструментів у створенні інтерактивного мистецтва», *Акт. пит. гуманіт. наук.*, т. 2, № 86, с. 108–113, 2025. https://doi.org/10.24919/2308-4863/86-2-17 .
[14] І. Голіяд та М. Тропіна, «Інноваційно-освітній кластер як платформа мультимодальної графічної підготовки,» *Пробл. сучасн. підручн.*, № 34, с. 89–106, 2025. https://doi.org/10.32405/2411-1309-2025-34-89-106 .
[15] UNESCO, *Guidance for Generative AI in Education and Research*, Paris, France: UNESCO, 2023. https://doi.org/10.54675/ewzm9535 .
[16] В. Большуткін, «Етичні виклики використання штучного інтелекту в освіті: порівняльний аналіз підходів країн Причорноморського регіону,» *у Матеріалах наук. конф. ЧНУ ім. Петра Могили, сер. «Освіта»*, № 1, с.13–16, 2025. https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.09.01 .
[17] R. T. Williams, «The ethical implications of using generative chatbots in higher education,» *Front. Educ.*, vol. 8, pp. 1–8, 2024. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1331607 .
[18] R. Arnheim, *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*. Berkeley, CA, USA: Univ. of California Press, 1974.
[19] W. Wong, *Principles of Form and Design*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1993.
[20] R. Datta, D. Joshi, J. Li, and J. Z. Wang, «Studying aesthetics in photographic images using a computational approach,» *in Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV),* 2006, pp. 288–301. https://doi.org/10.1007/11744078_23 .

Матеріал надійшов до редакції 17.02.2026 р.

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL FOR DEVELOPING STUDENTS' COMPOSITIONAL SKILLS IN TEACHING THE FUNDAMENTALS OF GRAPHIC COMPOSITION BASED ON HYBRID ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Olena Kraievska
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-8460-958X
kraevsck@gmail.com

Inesa Shelikhova
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
ORCID 0000-0002-5637-1850
inessa.shelikhova@gmail.com

Abstract. The article presents and substantiates a structural and functional model for learning and automated assessment of compositional skills in a VR environment based on hybrid artificial intelligence. The model is conceptualized as an integrated system combining the target, content-technological, procedural, and control-result components. Its functioning is ensured through the interaction between the VR environment and an analytical module powered by hybrid AI, which integrates rule-based analysis of classical compositional principles with data-driven computer vision algorithms.

The technical logic of the model is based on a multilevel analysis of scene parameters, which enables formalized calculations of the center of visual weight, symmetry, and geometric balance of elements, as well as the identification of compositional patterns derived from training data.
The scientific novelty lies in the creation of a comprehensive model capable of performing automated verification of 3D scene parameters in real time and generating individualized intelligent feedback for students. The practical significance of the proposed approach was confirmed by a pedagogical experiment (N=39) conducted with the use of digital learning resources and learning analytics. Statistical processing of the results using Pearson's χ^2 criterion demonstrated a statistically significant ($p < 0.05$) increase in the level of compositional skills formation in the experimental group compared to the control group, while the automated assessment algorithms showed high accuracy in comparison with expert evaluations of instructors.
The obtained results confirm the effectiveness of the proposed model and highlight the potential of integrating hybrid intelligent systems to enhance the quality of training future specialists in computer graphics, digital design, and engineering visualization.

Keywords: virtual educational environment; artificial intelligence; learning model; graphic composition; digital educational technologies; automated assessment.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

[1] G. Makransky and L. Lilleholt, «A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education,» *Education Tech Research Dev*, vol. 66, pp. 1141–1164, 2018. https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2 . (in English).
[2] G. Makransky, T. S. Terkildsen, and R. E. Mayer, «Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning,» *Learn. Instr.*, vol. 60, pp. 225–236, 2019. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007 . (in English).
[3] R. E. Mayer, *Multimedia Learning*, 3rd ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022. (in English).
[4] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, «A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education,» *Comput. Educ.*, vol. 147, p. 103778, 2020. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778 .(in English).
[5] L. Freina and M. Ott, «A literature review on immersive virtual reality in education: State of the art and perspectives,» in *Proc. eLearning Conf.*, 2015. [Online]. Available: https://hdl.handle.net/20.500.14243/290702 . (in English).
[6] V. Aleven, E. A. McLaughlin, R. A. Glenn, and K. R. Koedinger, «Instruction based on adaptive learning technologies,» in *Handbook of Research on Learning and Instruction*, 2nd ed., pp. 522-560. New York, NY, USA: Routledge, 2016. https://doi.org/10.4324/9781315736419 . (in English).
[7] B. Cope, M. Kalantzis, and D. Searsmith, «Artificial intelligence for education: Knowledge and its assessment in AI-enabled learning ecologies,» *Educ. Philos. Theory*, vol. 53, pp. 1229-1245, 2020. https://doi.org/10.1080/00131857.2020.1728732 . (in English).
[8] A. K. Saini, B. Cope, M. Kalantzis, and G. C. Zapata, « The future of feedback: Integrating peer and generative AI reviews to support student work,» EdArXiv, preprint, 2024. https://doi.org/10.35542/osf.io/x3dct . (in English).
[9] W. Holmes, M. Bialik, and C. Fadel, *Artificial Intelligence in Education: Promises and Implications for Teaching and Learning*. Boston, MA, USA: Center for Curriculum Redesign, 2019. [Online]. Available: https://curriculumredesign.org/our-work/artificial-intelligence-in-education/ . (in English).
[10] R. Luckin, *Machine Learning and Human Intelligence: The Future of Education for the 21st Century*. London, U.K.: UCL Institute of Education Press, 2018. (in English).
[11] S. H. Lytvynova et al., *Designing a Learning Environment Using Augmented and Virtual Reality Tools in Institutions of General Secondary Education.* Kyiv, Ukraine: Inst. for Digit. of Educ. of the NAES of Ukraine, 2023. (in Ukrainian).
[12] V. Kolomiiets, N. Savastru, and H. Shevchenko, «Art education as a tool for developing creative potential: modern approaches», *Pedagog. Acad.: Sci. Notes*, no. 14, 2025. https://doi.org/10.5281/zenodo.14789424 . (in Ukrainian).
[13] K. Liang, V. Mulkohaynen, and V. Milenkyi, «Using digital tools in creating interactive art,» *Act. Issues Humanit. Sci.*, vol. 2, no. 86, pp. 108–113, 2025. https://doi.org/10.24919/2308-4863/86-2-17 . (in Ukrainian).
[14] I. Holiiad and M. Tropina, «Innovation-educational cluster as a platform for multimodal graphic training,» *Problemy Suchasnoho Pidruchnyka*, no. 34, pp. 89–106, 2025. https://doi.org/10.32405/2411-1309-2025-34-89-106 . (in Ukrainian).

[15] UNESCO, *Guidance for Generative AI in Education and Research*, Paris, France: UNESCO, 2023. https://doi.org/10.54675/ewzm9535 . (in English).
[16] V. Bolshutkin, «Ethical challenges of artificial intelligence in education: A comparative analysis of approaches in the Black Sea region countries,» in *Mater. Sci. Conf. Petro Mohyla Black Sea Nat. Univ*., ser. «Education,» no. 1, pp. 13–16, 2025. https://doi.org/10.34132/mspc2025.01.09.01 . (in Ukrainian).
[17] R. T. Williams, «The ethical implications of using generative chatbots in higher education,» *Front. Educ.*, vol. 8, pp. 1–8, 2024. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1331607 . (in English).
[18] R. Arnheim, *Art and Visual Perception: A Psychology of the Creative Eye*. Berkeley, CA, USA: Univ. of California Press, 1974. (in English).
[19] W. Wong, *Principles of Form and Design*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1993. (in English).
[20] R. Datta, D. Joshi, J. Li, and J. Z. Wang, «Studying aesthetics in photographic images using a computational approach,» *Proc. Eur. Conf. Comput. Vis. (ECCV)*, pp. 288–301, 2006. https://doi.org/10.1007/11744078_23 . (in English).

(cc) BY-NC-SA

This work is licensed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.