

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ІМЕРСИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АРХІТЕКТУРІ

Вергунова Н. С.,

к. мист., доцент,

natalia.vergunova@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8470-7956

¹ *Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова*

Анотація. У статті розглянуто сучасні підходи до використання штучного інтелекту й імерсивного дизайну у формуванні архітектурних просторів. Цей процес зумовлений повсюдною цифровізацією, що пришвидшує трансформації в архітектурі та міському дизайні. На основі структурованого огляду сучасних досліджень і практичних прикладів Європи, США та Азії виокремлено й охарактеризовано ряд взаємодоповнювальних підходів, окреслено етичні та регуляторні вимоги до даних, прозорості й людського нагляду, що визначають подальший розвиток професії. Отримані результати надають комплексного бачення актуальних підходів і слугують підґрунтям для перегляду алгоритмів архітектурного проєктування та розроблення методичних засад оцінювання ефективності застосування штучного інтелекту та імерсивних технологій.

Ключові слова: штучний інтелект, імерсивний дизайн, віртуальна реальність, доповнена реальність, архітектурне проєктування, генеративний дизайн, CAD/BIM.

Вступ. Останніми роками зазначено стрімке зростання інтеграції штучного інтелекту (Artificial intelligence, AI) та імерсивних технологій, зокрема віртуальної реальності (Virtual reality, VR) і доповненої реальності (Augmented reality, AR) у процеси архітектурного та урбаністичного проєктування. ШІ, як обчислювальні системи, що виконують завдання, які традиційно вимагали людських когнітивних функцій, все більше проникає у робочі процеси архітектурної діяльності: від генеративних алгоритмів для концептуалізації на ранніх етапах до розвинених процедур аналітики експлуатаційних характеристик будівель і оптимізації [1]. Паралельно імерсивні технології проєктування вийшли на провідні позиції, пропонуючи нові можливості для візуалізації, безпосереднього переживання та колективного вдосконалення архітектурних просторів, істотно трансформуючи традиційні практики і педагогічні методики [2; 3].

Архітектурна спільнота дедалі більше визнає глибокий вплив і трансформаційний потенціал цих технологій, відзначаючи не лише їх здатність підвищувати ефективність і розширювати інноваційний простір проєктних пошуків, а й суттєві методологічні та етичні наслідки [4]. З методологічного погляду нещодавні дослідження підкреслюють нагальну потребу у структурованих рамках інтеграції, що узгоджують ШІ та імерсивні технології з усталеними архітектурними процесами і забезпечують, щоб технологічні спроможності підсилювали, а не замінювали людське ухвалення рішень. Наприклад, імерсивні середовища дають змогу всім учасникам процесу інтуїтивно «переживати» запропоновані простори у справжньому масштабі, що підвищує якість колективного ухвалення рішень і просторового розуміння порівняно з традиційними двовимірними репрезентаціями [5].

Разом із обнадійливими досягненнями ці технології принесли суттєві виклики. Питання прозорості, підзвітності, приватності даних і потенційних упереджень, закладених в алгоритмічно згенерованих проєктних рішеннях стали центральною темою обговорень серед теоретиків і практиків архітектури [6]. Ці етичні виміри є критичними, оскільки архітектурна практика не лише формує фізичні середовища, а й безпосередньо впливає на суспільні цінності, культурні ідентичності та умови сталого життя.

Попри значну кількість досліджень, що розкривають окреме застосування ІІІ або імерсивних технологій, комплексний синтез, що цілісно висвітлює їх методологічну інтеграцію, етичні наслідки та глобальні практики впровадження, залишається обмеженим. Наявні академічні огляди здебільшого акцентують або на технологічних спроможностях або на поодиноких прикладах використання, не розкриваючи системно міждисциплінарні практики та рамки врядування, необхідні для етичних і сталих архітектурних результатів [7;].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в розрізі зазначеної тематики демонструють інтенсивну розповсюдженість ІІІ в архітектурному проєктуванні з виразним зсувом від ранніх еволюційних підходів до багатокритеріальної оптимізації, що ґрунтується на симуляціях продуктивності та машинному навчанні (Machine learning, ML) [1]. Дослідження з глибокого навчання (Deep learning, DL) підтверджують як аналітичний, так і синтетичний потенціал ІІІ-алгоритмів, що свідчить про здатність систем виявляти стилістичні закономірності, релевантні історико-теоретичному дискурсу [9]. Інші дослідження фіксують, як імерсивні технології віртуальної та доповненої реальності розширюють можливості інтуїтивного проєктування й навчання, охоплюючи 3D-скетчинг, прототипування, клієнтські презентації і віддалену співпрацю, хоча питання вартості, апаратної спроможності та інтеграції конвеєрів інформаційного моделювання будівель (Building information modeling, BIM) з VR залишаються суттєвими обмеженнями [2]. Окремий сегмент складають теоретичні праці, присвячені використанню новітніх інструментів в педагогічній діяльності. Так в освітній практиці поширюється зв'язка формування первинного об'ємно-просторового моделювання будівлі з визначенням габаритів, пропорцій, орієнтації та взаємодії об'ємів без опрацювання деталей у VR з подальшою деталізацією в системах автоматизованого проєктування (Computer-Aided Design, CAD), що підсилює просторове розуміння, але потребує методик оцінювання отриманих результатів [2]. Деякі дослідження відмічають зближення ІІІ та імерсивних технологій у концепції Парамерсивного дизайну (Paramersive design), що переводить віртуальну реальність з режиму перегляду до активного середовища для проєктування. Це може бути визначено як вектор подальшої інтеграції ІІІ-інструментів та імерсивних методів у єдині процеси.

Постановка завдання. Мета дослідження полягає у виявленні сучасних підходів застосування штучного інтелекту та імерсивних технологій при формуванні архітектурного середовища. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- проаналізувати наявні концепції та приклади практичного використання ІІІ й імерсивного дизайну в архітектурній діяльності;
- на підставі сучасних досліджень виокремити та охарактеризувати підходи, що мають найбільший потенціал для подальшого розвитку професії архітектора.

Із огляду на специфіку наукової статті застосовано системно-міждисциплінарний підхід, що забезпечив розгляд використання штучного інтелекту та імерсивних технологій у формуванні архітектурного середовища в контексті актуальних науково-технічних, освітніх і професійних тенденцій. Як базові методологічні орієнтири для аналізу конкретних рішень використано методи функціонально-програмного аналізу для виявлення цілей, сценаріїв і ролі проєктанта; конструктивно-технологічного аналізу для розгляду інтеграції новітніх інструментів у середовища CAD та BIM; оцінювально-оптимізаційного аналізу для зіставлення багатокритеріальних показників; класифікаційно-типологічного підходу для групування ІІІ підходів на генеративні, оціночні, оптимізаційні та гібридні; порівняльного аналізу для роботи з практичними прикладами Європи, США та Азії. Подібний методологічний конгломерат дозволив деталізовано розглянути складові цифрових процесів, їх функціональне призначення та технологічну реалізацію, а також окреслити етичні та нормативні межі відповідального впровадження.

Основний матеріал і результати. Сучасні дослідження показують, що ІІІ застосовується на багатьох етапах архітектурної роботи, в першу чергу, в генеративному проєктуванні для створення форм або планувальних рішень на основі заданих цілей і

обмежень. Згідно досліджень, ранні напрацювання в цьому контексті часто базувалися на еволюційних обчисленнях, таких як генетичні алгоритми (Genetic algorithms) та клітинні автомати (Cellular automata), щоб удосконалювати просторові форми будівель, споруд і плани поверхів [1]. Ці підходи трактували концептуальне проектування як відкритий пошук, а чимало початкових ІІІ-систем зосереджувалися на творчому формоутворенні, зокрема на експериментах із еволюційними розв'язувачами для фасадів, павільйонів і варіантів планувань. Із розвитком галузі увага змістилася від новизни до оптимізації за показниками ефективності, і в новітніх застосуваннях у генеративний цикл інтегрують моделювання та оцінювання структурної поведінки, енергоефективності та інших критеріїв, використовуючи машинне навчання для багатокритеріальної оптимізації.

Поширена класифікація ІІІ в архітектурі розрізняє методи, що підсилюють спроможності архітектора, і методи, що автоматизують окремі завдання, причому на практиці більшість систем працює як підсилений інтелект, що генерує пропозиції або аналітику, як це робить людина, коли інтерпретує і доопрацьовує. Інтерактивні еволюційні алгоритми дають змогу архітекторам керувати відбором згенерованих варіантів через вираження власних уподобань, поєднуючи людське судження з алгоритмічним пошуком. Глибоке навчання розширило як аналітику, так і генерацію, а згорткові нейронні мережі (Convolutional neural networks, CNN) застосовують для класифікації архітектурних зображень і синтезу проєктів у відповідному стилі або за певним авторством. Так в роботі Юджі Йосімура (Yuji Yoshimura) та інших представлено ІІІ-модель, що визначає архітектора будівлі за зображенням із точністю 73% в розрізі 34 архітекторів [9]. Поза класифікацією випробовуються генеративно-змагальні мережі (Generative adversarial networks, GAN) для створення планувальних рішень і фасадів, що наслідують цільовий стиль або оптимізують просторові якості. Суто даноорієнтовані генератори досі мають перешкоди, зокрема контроль функціональної життєздатності та потребу у великих навчальних наборах, що обмежує їх використання в реалізованих об'єктах.

Для розв'язання складних проєктних завдань, застосовуються гібридні підходи, що поєднують параметричне проектування з оптимізацією за допомогою ІІІ. В дослідженні Спиридона Ампанавоса (Spyridon Ampanavos) і Алі Малькаві (Ali Malkawi) інтегровано генеративні параметричні моделі з алгоритмами пошуку для оптимізації ранніх стадій проєктів за енергоефективністю, вбудовуючи симуляції на основі фізики так, щоб кожна ітерація відповідала екологічним цілям [10]. Інший напрям використовує штучні нейронні мережі (Artificial neural networks, ANN) як сурогатні моделі для швидкого прогнозування показників, що забезпечує зворотний зв'язок у реальному часі під час пошуку форми, так в роботі Хао Чжен (Hao Zheng) та Філіпа Ф. Юаня (Philip F. Yuan) навчено ANN-систему генерувати та оцінювати просторові форми будівель, що дало змогу виконувати тисячі ітерацій із залученням набутого знання для архітектурного й урбаністичного проектування [11]. Такі методи прискорюють дослідження великих просторових рішень, що раніше були недосяжними для вичерпного ручного чи звичного обчислювального пошуку. Дослідники також пропонують модульні рамкові підходи для масової індивідуалізації за участі ІІІ, коли генеративна система створює багато варіацій житлового модуля, налаштованих під потреби користувачів у межах визначених естетичних параметрів [12].

В розрізі цих підходів цифровий інструментарій архітектора зміщується у бік безшовної інтеграції штучного інтелекту безпосередньо в програмне забезпечення для проектування, а не сприйняття його як окремої «чорної скриньки». Сьогодні в архітектурній діяльності ІІІ-системи здебільшого виступають в якості додаткових плагінів або зовнішніх сервісів, тоді як майбутні платформи можуть вбудовувати ІІІ в саму основу як асистента всередині САД-систем та ВІМ-технологій [13]. За такого підходу програмне забезпечення може охоплювати рутинні або оптимізаційні завдання, частково перебираючи окремі зони відповідальності в межах проєкту, а архітектор зосереджується на рішеннях вищого рівня. Виразною траєкторією є поява генеративних функцій у комерційних інструментах, як це представлено в Autodesk Generative Design, спочатку Project Refinery, що формує багато

варіантів планувальних рішень відповідно до цілей, заданих архітектором, наприклад максимізація денного освітлення або мінімізація обсягу конструкцій, завдяки чому частина ітерацій автоматизується, а архітектори відбирають і доопрацьовують результати. Це ілюструє модель співтворчості людини та ШІ, що набирає обертів, і нещодавні проекти демонструють, що автоматизація повторюваної аналітики за допомогою ШІ звільняє час для креативного та контекстуального мислення [14].

Підсумовуючи, методології ШІ в архітектурі можна згрупувати за метою на генеративні, що створюють варіанти проєктних рішень, оціночні, що аналізують або прогнозують показники, стиль чи реакцію користувачів, та оптимізаційні, що шукають найкраще рішення за заданих цілей. Багато робочих процесів інтегрують усі три підходи, наприклад генератор, керований оптимізатором, із проміжними перевітками за допомогою навчених моделей або фізично обґрунтованого моделювання. Від приблизно 2015 року дослідження швидко розвиваються завдяки зростанню обчислювальних потужностей і розвитку машинного навчання, а провідним напрямом є чутливе до показників генеративне проєктування, що узгоджує естетичний пошук з інженерними критеріями. При цьому архітектор залишається в циклі, а ШІ трактується як підсилювальний інструмент, що розширює дослідження простору рішень і поліпшує роботу з даними, а не замінює творчу інтуїцію та критичне судження. Такий людиноцентричний підхід також лежить в основі подальших напрацювань в імерсивному проєктуванні.

Імерсивні технології, такі як віртуальна реальність (VR) і доповнена реальність (AR), дедалі ширше застосовуються в архітектурі, щоб зробити процеси проєктування інтуїтивнішими та більш залучальними, при цьому VR за допомогою гарнітур занурює архітекторів та інших учасників у повномасштабну цифрову модель, а AR накладає цифровий контент на фізичне середовище через мобільні пристрої або окуляри для попереднього перегляду будівлі безпосередньо на реальній ділянці. Разом ці інструменти створюють реалістичну ілюзію перебування у просторовій проєктній пропозиції та сприяють прояву відповідних емоцій. Застосування цих технологій розповсюджується не тільки на проєктний процес в розрізі архітектурної діяльності, але й при підготовці фахових спеціалістів, зокрема для інтерактивного 3D-скетчингу й 3D-моделювання, віртуального прототипування варіантів, імерсивних презентацій для замовників і віддаленої співпраці в спільних віртуальних середовищах [2].

VR міцно закріпилася в архітектурній освіті та студіях, де викладачі запроваджують VR-вправи як доповнення к традиційним методикам викладання. За допомогою відповідного інструментарію, наприклад, Gravity Sketch і Unity3D, студенти моделюють власні проєктні рішення безпосередньо у VR у повному масштабі, що стимулює творче мислення та посилює просторове розуміння. У пілотній та повністю віртуальній студії «ImDeCo» (Immersive Design & Collaboration), проєктний досвід якої представлено в дослідженні М. Ф. Аль-Сувайді (Mohammed Faraj Al-Suwaidi) та інших, зазначено, що інтеграція VR як основного інструменту проєктування дозволила студентам й викладачам зустрічатися всередині віртуального спільного простору моделі, разом з тим було зафіксовано вищу залученість здобувачів і кращу здатність відчувати масштаб, освітлення та атмосферу під час проєктного процесу, що важче передати на 2D екрані [5]. Також в дослідженні окреслено додаткові переваги для освіти і практичної діяльності, зокрема яснішу візуалізацію складних форм, кращу комунікацію між проєктантом та замовником, раннє виявлення проєктних проблем завдяки віртуальним проходкам і групову креативність, коли кілька учасників спільно досліджують і редагують модель у реальному часі, що приносить користь міждисциплінарним командам [5].

Поряд із перевагами використання імерсивних технологій в літературних джерелах нерідко зазначаються і недоліки. До технічних бар'єрів належать вартість і доступність гарнітур і достатньо потужних комп'ютерів, а також потреба опановувати нові інтерфейси. Окремо слід зазначити, що за низької якості симуляції користувачі можуть відчувати запаморочення або втому, що шкодить здоров'ю. Інтеграція у робочі процеси є суттєвою

перешкодою, оскільки моделі доводиться переносити між платформами BIM і VR, так в деяких дослідженнях зазначено, що для імпорту моделей створювалися спеціальні скрипти, а це свідчить про обмеженість готових інтеграцій в програмних інструментах [2]. При підготовці фахівців з архітектури VR сприяє заохоченню студентів до більш сміливого дослідження форми, проте не відміння необхідності виконання супровідної документації, що нерідко занедбується здобувачами. Тому здебільшого нові підходи поєднують імерсивні й традиційні методи, наприклад формування об'ємно просторового опрацювання будівлі на рівні загальних мас у VR, її пропорцій і силуету без деталізації конструкцій та інтер'єрів з перевіркою розміщення на ділянці, орієнтації, інсоляції, висотності, оглядів і потоків, із подальшою деталізацією у системах комп'ютерного проєктування (CAD) [15]. Забезпечення сумісності імерсивних технологій з наявним програмним забезпеченням залишається критично важливим для успішного впровадження.

В проєктній діяльності використання AR дозволило продемонструвати цифрове архітектурне рішення споруди на реальній ділянці і зібрати миттєві відгуки через мобільні пристрої, що поліпшило розуміння пропозиції та підвищило активну залученість користувачів порівняно з 2D кресленнями [15]. Також AR може бути застосовано на будівельних ділянках для звіряння BIM-моделі із фактичним ходом робіт, що підтримує точніші та своєчасніші рішення під час будівництва. VR широко використовується для презентацій замовникам, доповнюючи статичні рендери повноцінними віртуальними проходами, щоб користувачі могли відчувати атмосферу ще не збудованого простору, що часто пришвидшує погодження та зменшує зміни на пізніх етапах, оскільки проблеми виявляються раніше під час дослідження віртуальної споруди.

Новий напрям поєднує штучний інтелект з імерсивними середовищами, створюючи інтелектуальні простори проєктування. Термін «Paramersive design» означає синтез параметричних генеративних методів з імерсивними інтерфейсами віртуальної або змішаної реальності, де проєктант може коригувати параметри у VR, миттєво спостерігаючи зміни, згенеровані ШІ, тоді як генеративні алгоритми працюють у тлі, а результати з'являються у реальному часі, що замикає цикл між людською інтуїцією та машинним обчисленням [3]. Це переводить VR із пасивного засобу перегляду в активний простір проєктування, де архітектори взаємодіють з алгоритмами в інтуїтивному просторовому контексті. Попри експериментальний характер, це відображає стрімку конвергенцію імерсивних технологій з ШІ у сучасній архітектурній практиці [13]. Імерсивні технології проєктування вже відіграють вагомий роль в архітектурі, роблячи процес більш інтерактивним, додаючи людиноцентрований вимір, що дозволяє проєктантам і користувачам пережити простір до його зведення та доповнює орієнтовані на дані сильні сторони інструментів ШІ. Рівень упровадження VR і AR у світі різняться, проте спостерігається активне використання в освітніх закладах і прогресивних архітектурних бюро, а інтерес до віртуальної колаборації зріс у період COVID 19. Актуальні виклики пов'язані з удосконаленням технологій і їх інтеграцією в щоденну практику. Водночас наведені далі проєктні рішення показують, що імерсивні інструменти вже мають відчутний вплив у реальних проєктах, часто у поєднанні з методами, керованими ШІ.

Розглянемо декілька прикладів практичного застосування ШІ та імерсивного дизайну в архітектурній діяльності. В Лісабоні розроблена інтерактивна екскурсія по залах монастиря Мадре де Деус (Madre de Deus) XVI століття, що значною мірою був втрачений і перебудований у реальності. Спираючись на попередні цифрові реконструкції та історичні дослідження з детальними моделями минулих станів цього зразка культової архітектури, було побудовано відповідне імерсивне середовище, що функціонує на онлайн-платформі «Shapspark» [16]. Користувачі можуть віртуально проходити нинішнім музеєм, що займає залишки комплексу, і перемикатися на змодельовані простори XVI століття, безпосередньо переживаючи відчуття оточуючої архітектури, що фізично більше не існує. Це також сприяє посиленню освітньої складової у сфері архітектурної спадщини, зростанню розуміння змін у

часі, а інтерактивний формат «оживлює» історію, підтримуючи емпатію до збереження та розширюючи аудиторію поза межі академічної спільноти.

Методологічно цей проєкт показує межі використання готових імерсивних платформ для спеціалізованого подання матеріалу, оскільки змістовне наповнення віртуальної екскурсії довелося підлаштовувати під обмеження платформи «Shapspark», що охоплює перегляд моделі лише в одному стані. Це зумовило потребу у скриптових переходах для відтворення двох історичних періодів, що відображає ширшу проблему невідповідності типових VR рішень специфічним проєктним завданням і вимагає гнучкості роботи з відповідним інструментарієм. В етичному вимірі застосовано підхід параданих (paradata), що включають системне фіксування джерел, методів, робочих припущень, рівнів упевненості та розглянутих альтернатив за кожним кроком реконструкції споруди, що забезпечує прозорість і наукову точність за високої візуальної переконливості результату [16]. Отже довгострокові питання охоплюють сталість цифрової спадщини та збереження VR досвіду в умовах еволюції програмного й апаратного забезпечення, а представлене проєктне рішення демонструє, як імерсивний підхід збагачує комунікацію спадщини, поєднуючи дослідження і технології з послідовним поданням інформації, водночас окреслюючи практичні обмеження платформ з акцентом на важливості методологічної прозорості у середовищі з високим ризиком хибного сприйняття.

В іншому прикладі, хмарочосі Уан-Вандербільт у Нью Йорку (One Vanderbilt), продемонстровано інтеграцію ШІ задля оптимізації масштабного проєкту. При розробці 59 поверхової архітектурної споруди було застосовано інструменти машинного навчання та імітаційні моделі для уточнення конструктивних і технологічних рішень. Слід зазначити, що оптимізація конструктивної системи будівлі ґрунтувалася на навчанні моделей на тисячах варіантів для досягнення цільових показників, наприклад, прогинів за сильних вітрових навантажень із меншим обсягом сталі порівняно з ручними підходами, а прогностичні моделі підтримували послідовність будівництва з метою скорочення строків і витрат. Огляди застосування ШІ в реалізації таких споруд, як Уан-Вандербільт, фіксують зростання конструктивної ефективності, коротші графіки реалізації та прискорене введення в експлуатацію вискоєфективної будівлі [17]. Цей архітектурний проєкт демонструє позитивний прецедент практичного застосування ШІ в архітектурній діяльності, поруч із інженерією та будівництвом, що підтримуються алгоритмами ШІ-інструментарію, не в якості заміни фахівців, а як допоміжний робочий арсенал. Команди з архітекторів та конструкторів застосовували генетичний алгоритм для дослідження геометрії систем розкосів, а інженери визначали цілі та обмеження і обирали остаточну схему, зберігаючи відповідальність і здійснюючи перевірки відповідності нормам і безпеці. Реалізація проєкту супроводжувалася активною комунікацією, залучаючи всіх учасників до постійного взаємозв'язку із ґрунтовним поясненням щодо тих чи інших змін у проєкті згідно оприлюдненої в Нью Йорку «ШІ стратегії» (AI Strategy) для публічного сектору, що спрямована на відповідальне застосування ШІ в міських проєктах [17].

Азійський регіон вирізняється передовими застосуваннями ШІ в архітектурі та урбаністичному плануванні за підтримки значних державних і галузевих інвестицій, що підтверджують розробки інструментів планування для нових районів у Китаї, де використано генеративні змагальні мережі (GAN) і глибоке навчання з підкріпленням (Deep reinforcement learning, DRL) [18; 19]. На рівні практичного впровадження планувальні агентства Китаю вже використовують ШІ як підтримку ухвалення рішень, зокрема під час планування Нової зони Сюн'ань у провінції Хебей застосовано аналітику ШІ для розміщення транспортних хабів і зелених коридорів з урахуванням великої кількості взаємопов'язаних змінних, що перевищують людські можливості оброблення в ручному режимі [18; 19].

У будівельному масштабі інноваційні архітектурні бюро в Азії застосовують ШІ для оптимізації фасадів шляхом коригування тисяч геометрій панелей з метою зменшення сонячних теплоприпливів, а хмарочос Шанхайська вежа (Shanghai Tower) демонструє комплексну інтеграцію ШІ на етапах проєктування, інженерії та експлуатації [20].

Характерний скручений обрис вежі обґрунтовано результатами аеродинамічного аналізу за участі ІІІ у поєднанні з алгоритмічною оптимізацією параметрів повороту та конусності, що забезпечило зменшення бічного вітрового навантаження на 24 відсотки порівняно зі статичною формою. Командою проєктувальників було поєднано чисельні симуляції з пошуковими алгоритмами для архітектурного задуму, балансування його стійкості та ефективності, а системи керування будівлею вже після введення в експлуатацію, продовжують використовувати ІІІ для моніторингу та оперативного коригування роботи систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (Heating, ventilation and air conditioning, HVAC) задля заощадження енергії [20].

Наведені приклади архітектурних споруд демонструють спільні закономірності та підкреслюють значення міждисциплінарної методології, де архітектори взаємодіють із фахівцями з ІІІ та галузевими експертами, поєднуючи людський досвід з машинними обчисленнями. Зафіксовані переваги є відчутними та багатовимірними, охоплюючи зростання ефективності процесів, посилення креативності, яснішу комунікацію всіх учасників процесу та ухвалення рішень, підкріплене аналізом великого масиву даних. У Лісабоні засоби віртуальної реальності розширили розуміння історії, у Нью-Йорку штучний інтелект поліпшив експлуатаційні показники будівлі, у Китаї ІІІ пропонує стратегії для складних міських завдань. Разом із тим постають виклики як організаційного, так і технічного порядку, що охоплюють інтеграцію нових ІІІ-інструментів в усталені процеси, підготовку команди та подолання скепсису щодо алгоритмічних результатів. Етичний і управлінський виміри проступають у кожному прикладі: від вимог історичної достовірності та прозорості у віртуальній реальності до підзвітності за рішення, створені за участі ІІІ, і збереження людських цінностей у міському плануванні.

Аналіз досліджень та наведені практичні приклади свідчать про трансформаційний етап розвитку архітектурної галузі. Штучний інтелект та імерсивні технології проєктування перестали бути суто теоретичними концептами й активно змінюють способи задуму, оцінювання та реалізації проєктів, водночас висуваючи комплекс методологічних, професійних і етичних питань. Таким чином, чітка методологія застосування новітніх інструментів є критично важливою, однак наразі перебуває на етапі становлення. Для ІІІ необхідні надійні набори даних, коректна перевірка та галузева адаптація, оскільки ймовірнісні даноорієнтовані процеси складніше прогнозувати і контролювати. Достовірність результатів забезпечує ретельне навчання, системне тестування та гібридні підходи, зокрема поєднання машинного навчання з перевітками на основі правил. Генеративне проєктування має супроводжуватися перевітками конструктивної спроможності та відповідності нормам, щоб отримувати проєктні рішення, придатні до реалізації, що є передумовою переходу від досліджень до практики. Необхідною умовою є прозорість роботи ІІІ-моделі, отже необхідними є зрозумілі пояснення способу отримання результату. Методологічна підзвітність поширюється і на імерсивне проєктування, тож під час використання віртуальної реальності слід визначати навчальні цілі та алгоритми дій, включно з доцільністю вибору віртуальної реальності порівняно з традиційними проєктними засобами.

Інтеграція штучного інтелекту та імерсивних інструментів трансформує роль і робочий процес архітектора в бік керування складними цифровими процесами, коли фахівець визначає цілі, курує набори даних, обирає серед алгоритмічних опцій і вибудовує проєктну структуру. Можна зазначити, що творчий процес в даному випадку трансформується і передбачає постановку завдань для генеративних алгоритмів із подальшим визначенням відповідних пріоритетів, тоді як рутинні завдання делегуються ІІІ або автоматизованим процедурам, що вивільняє час для дослідження, але вимагає нових компетентностей обчислювального мислення, грамотності у роботі з даними та впевненого володіння сучасним програмним забезпеченням.

Таким чином, архітектурні освітні програми і системи підвищення кваліфікації мають адаптуватися, інтегруючи параметричне проєктування, основи ІІІ та прототипування у віртуальній реальності, а перші свідчення демонструють кращі результати за умови

викладання ШІ як студійного інструмента [21]. Глобальна динаміка лишається нерівномірною, так у технологічно прогресивних середовищах США та Китаю архітектори працюють у тісній зв'язці з фахівцями з даних, тоді як в інших країнах ці інструменти залишаються периферійними й зосередженими в обмеженій кількості спеціалістів.

Етичний вимір і відповідальне використання є не менш важливими, оскільки ШІ-системи здатні кодувати упередження за нерепрезентативних навчальних даних, що призводить до рішень, що ігнорують окремі культури, кліматичні умови чи групи користувачів. Авторство та оригінальність породжують практичні питання інтелектуальної власності в проєктах, виконаних за допомогою ШІ-інструментів, адже право на результат може бути непевним за наявності численних прецедентів у навчальних даних. У більшості архітектурних бюро ШІ трактують як інструмент і зберігають авторство за остаточним твором, хоча повністю алгоритмічно згенерована естетика може бути потенційно оскарженою. Зсув у професійних компетентностях теж є нагальним питанням, коли архітектори концентруються на розумінні контексту, людських потреб, культурного змісту та етичного судження, тоді як ШІ переважає в обчисленнях і швидкому варіюванні без власної інтенціональності. Освіта і професійне врядування мають керувати переходом через навчання алгоритмічному проєктуванню, імерсивним робочим процесам і етиці, щоб проєктанти могли ставити критичні запитання до рішень ШІ, фіксувати і зберігати підзвітність, за необхідності відхиляючи результати ШІ, що можуть бути конструктивно ефективними, але естетично слабкими або соціально недоречними.

Також фіксується зростання активності щодо розроблення державних та міських настанов для використання штучного інтелекту у проєктуванні, зокрема затверджений в 2024 році Європейським Союзом Акт ШІ (AI Act) імовірно відноситиме ШІ-інструменти для сектору архітектури, інженерії та будівництва (Architecture, engineering, construction, АЕС) до високоризикових у разі впливу на безпеку або при використанні для управління критичною інфраструктурою. Професійні об'єднання, наприклад, Американський інститут архітекторів (American Institute of Architects, AIA) формує робочі групи з цифрової практики для підготовки відповідних рекомендацій, а ШІ-стратегія Нью Йорка акцентує цифрову етику та рівність у публічно орієнтованих проєктах [17]. Зазначені документи наполягають на увазі до алгоритмічних упереджень і збереженні людського нагляду за роботою ШІ. Оскільки врядування нерідко відстає від впровадження, архітектурна спільнота має долучитися до створення Кодексу практик ШІ в архітектурі з визначенням моментів, коли потрібен обов'язковий людський перегляд, особливо для рішень, критичних до безпеки, принципів перевірки результатів, згенерованих ШІ, і процедур організації публічного зворотного зв'язку в міських пропозиціях.

Ключовим також може бути позначене взаємне доповнення штучного інтелекту та імерсивного проєктування, їх сильних сторін в архітектурній діяльності, де ШІ опрацьовує складність і забезпечує широту варіантів, а імерсивні технології додають глибину розуміння та людську залученість, у поєднанні це створює безперервний цикл *згенерувати, оцінити, пережити, уточнити*, як у прикладах параметричного підходу разом із віртуальною реальністю або залучення користувачів за участі ШІ разом із доповненою реальністю, і формує цілісну методологію, орієнтовану на людиноцентричність. Таке зближення концентрує виклики обох напрямів, тому архітекторам потрібні поєднані компетентності у технічному, соціальному та етичному вимірах, а також імовірне формування нових фахових ролей, наприклад, архітектор імерсивних середовищ в професійних бюро або стратег щодо інтеграції ШІ у проєктні практики.

Висновки. У науковій статті наведено й розглянуто сучасні підходи до розуміння штучного інтелекту та імерсивного дизайну в додатку до архітектурної діяльності. Аналітичний огляд публікацій та практичних прикладів застосування дав змогу виокремити ряд тенденцій, що вже впливають на професію архітектора і визначають напрями подальшого розвитку галузі. Слід відзначити формування генеративного підходу, у межах якого алгоритми створюють широку множину варіантів форми споруди і її планувальних

рішень під задані цілі та обмеження, а архітектор здійснює керований відбір і поетапне уточнення результату. Разом з цим, набуває актуальності оціночний і прогностичний підхід, де методи машинного та глибокого навчання швидко класифікують об'єкти і прогнозують показники, надаючи миттєвий зворотний зв'язок у процесі пошуку архітектурної форми. Також поширюються оптимізаційні практики багатокритеріального пошуку з урахуванням симуляцій конструктивної роботи, енергоефективності та комфорту, що дає можливість узгоджувати естетику і технічні вимоги в архітектурному проєкті. Гібридні рішення поєднують параметричні моделі з навчальними та пошуковими алгоритмами, відкриваючи шлях до масової індивідуалізації в межах чітко визначених естетичних і функціональних параметрів.

Програмний інструментарій архітектора еволюціонує до вбудованих асистентів у середовищах комп'ютерного проєктування та інформаційного моделювання будівель, де штучний інтелект стає сервісом підтримки рішень і частково бере на себе повторювані аналітичні операції. Імерсивні практики віртуальної та доповненої реальності розширюють можливості формування об'ємно просторового опрацювання споруди на рівні загальних мас, просторового тестування, клієнтських презентацій, а також підсилюють спільну роботу команд у віддалених форматах. Відбувається зближення штучного інтелекту та просторових інтерфейсів, коли параметричні і генеративні методи працюють безпосередньо у віртуальному або змішаному середовищі, забезпечуючи миттєвий відгук і переводячи перегляд у спільне конструювання простору.

Отримані результати пропонують цілісну картину сучасних підходів і можуть бути використані для переосмислення алгоритмів архітектурного проєктування та формування методичних основ оцінювання результатів застосування штучного інтелекту та імерсивних технологій. Це дає підстави для очікування подальшого посилення людиноцентричного та орієнтованого на дані характеру професійної практики, підвищення якості рішень і появу нових ролей, зокрема спеціалістів зі стратегії проєктування за участі штучного інтелекту та фахівців з проєктування імерсивних середовищ. Подальше дослідження може бути спрямовано на більш детальний аналіз практичних прикладів в архітектурі, реалізація та експлуатація яких охоплює III-інструментарій і імерсивні технології, з оцінюванням впливу на естетичні, функціональні та інші фактори.

Література

- [1] M. L. Castro Pena, A. Carballal, N. Rodríguez-Fernández, I. Santos, and J. Romero, "Artificial intelligence applied to conceptual design: A review of its use in architecture", *Automation in Construction*, vol. 124, art. no. 103550, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103550>
- [2] M. F. Al-Suwaidi, A. Agkathidis, A. Haidar, and D. Lombardi, "Application of immersive technologies in the early design stage in architecture education: a systematic review", *Architecture and Planning Journal*, vol. 28, no. 3, art. no. 27, 2023. <https://doi.org/10.54729/2789-8547.1222>
- [3] A. Drogemuller, H. Sakhaei, A. Cunningham, R. Yu, N. Gu, and B. Thomas, "Envisioning Paramersive Design: An Immersive Approach to Architectural Design and Review", in *Proc. IEEE ISMAR 2023 Adjunct*, Sydney, Australia, 2023, pp. 261–265.
- [4] N. Gardner, M. H. Haeusler, and Y. Zavoleas, *Computational Design: From Promise to Practice*. Stuttgart, Germany: AVEdition, 2020.
- [5] M. F. Al-Suwaidi, A. Agkathidis, A. Haidar, and D. Lombardi, "Immersive Technologies in Architectural Education: A pedagogical framework for integrating virtual reality as the main design tool in a fully virtualised architectural design studio environment", in *Proc. 41st Conf. Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*, Austria, 2023, pp. 89–98.
- [6] J. Burry, *Fabricate 2020: Making Resilient Architecture*. London, U.K.: UCL Press, 2020.

- [7] B. Bölek, O. Tural, and H. Özbaşaran, "A systematic review on artificial intelligence applications in architecture", *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, vol. 4, no. 1, pp. 91–104, 2023. <https://doi.org/10.47818/DRArch.2023.v4i1085>
- [8] C. J. Liang, T. H. Le, Y. Ham, B. R. K. Mantha, M. H. Cheng, and J. J. Lin, "Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry", *Automation in Construction*, vol. 162, art. no. 105369, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105369>
- [9] Y. Yoshimura, B. Cai, Z. Wang, and C. Ratti, "Deep Learning Architect: Classification for Architectural Design Through the Eye of Artificial Intelligence", in *Proc. CUPUM 2019: Computational Urban Planning and Management for Smart Cities*, Cham, Switzerland, 2019, pp. 249–265.
- [10] S. Ampanavos and A. Malkawi, "Early-Phase Performance-Driven Design Using Generative Models", *Computer-Aided Architectural Design*, vol. 1465, pp. 87–106, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.08572>
- [11] H. Zheng and P. F. Yuan, "A generative architectural and urban design method through artificial neural networks", *Building and Environment*, vol. 205, art. no. 108178, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108178>
- [12] S. Azadi and P. Nourian, "GoDesign: A Modular Generative Design Framework for Mass-customization and Optimization in Architectural Design", in *Proc. 39th eCAADe Conf.*, Novi Sad, Serbia, 2021, pp. 285–294.
- [13] Н. С. Вергунова, та М. Ю. Блінова, "Тенденції застосування штучного інтелекту та іммерсивного дизайну при формуванні архітектурного середовища", *Комунальне господарство міст. Серія: архітектура*, № 3 (184), с. 59–64, 2024. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-59-64>
- [14] Y. Chen, H. Wang, S. Hill, and B. Li, "Consumer attitudes toward AI-generated ads: Appeal types, self-efficacy and AI's social role", *Journal of Business Research*, vol. 185, art. no. 114867, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114867>
- [15] B. Shouman, A. A. E. Othman, and M. Marzouk, "Enhancing users' involvement in architectural design using mobile augmented reality", *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. 6, pp. 2514–2534, 2022. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0124>
- [16] J. Rafeiro, A. Tomé, and M. Nazário, "Immersive learning for lost architectural heritage: Interweaving the past and present, physical and digital in the Monastery of Madre de Deus", *Sustainability*, vol. 16, no. 3, art. no. 1156, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16031156>
- [17] Collaborating with Municipal Governments on Assessing the Digital Rights Impacts of Their Datafied Technologies. Digital Life Initiative, Cornell Tech. [Online]. Available: <https://dli.tech.cornell.edu/research-projects>. Accessed on: November 1, 2025.
- [18] C. Wang, F. Chen, J. Wu, Y. Zhao, H. Lei, J. Liu, and D. Wen, "Progress in mechanism and data processing of visual sensing", *Journal of Image and Graphics*, vol. 25, no. 1, pp. 19–30, 2020. <https://doi.org/10.11834/jig.190404>
- [19] Z. Zhang, J. M. Fort, and L. Giménez Mateu, "Exploring the potential of artificial intelligence as a tool for architectural design: A perception study using Gaudí's works", *Buildings*, vol. 13, no. 7, art. no. 1863, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13071863>
- [20] Case studies of projects designed using AI-generated solutions. Re-Thinking The Future. [Online]. Available: <https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-community/a11224-case-studies-of-projects-designed-using-ai-generated-solutions/>. Accessed on: October 15, 2025.
- [21] A. F. Almaz, E. A. Elsayed, M. H. Abdelfatah, and I. R. Mohamed, "The future role of artificial intelligence design's integration into architectural and interior design education is to improve efficiency, sustainability, and creativity", *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 3, pp. 1749–1772, 2024. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120336>

References

- [1] M. L. Castro Pena, A. Carballal, N. Rodríguez-Fernández, I. Santos, and J. Romero, "Artificial intelligence applied to conceptual design: A review of its use in architecture", *Automation in Construction*, vol. 124, art. no. 103550, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103550>
- [2] M. F. Al-Suwaidi, A. Agkathidis, A. Haidar, and D. Lombardi, "Application of immersive technologies in the early design stage in architecture education: a systematic review", *Architecture and Planning Journal*, vol. 28, no. 3, art. no. 27, 2023. <https://doi.org/10.54729/2789-8547.1222>
- [3] A. Drogemuller, H. Sakhaei, A. Cunningham, R. Yu, N. Gu, and B. Thomas, "Envisioning Parametric Design: An Immersive Approach to Architectural Design and Review", in *Proc. IEEE ISMAR 2023 Adjunct*, Sydney, Australia, 2023, pp. 261–265.
- [4] N. Gardner, M. H. Haeusler, and Y. Zavoleas, *Computational Design: From Promise to Practice*. Stuttgart, Germany: AVEdition, 2020.
- [5] M. F. Al-Suwaidi, A. Agkathidis, A. Haidar, and D. Lombardi, "Immersive Technologies in Architectural Education: A pedagogical framework for integrating virtual reality as the main design tool in a fully virtualised architectural design studio environment", in *Proc. 41st Conf. Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe)*, Austria, 2023, pp. 89–98.
- [6] J. Burry, *Fabricate 2020: Making Resilient Architecture*. London, U.K.: UCL Press, 2020.
- [7] B. Bölek, O. Tural, and H. Özbaşaran, "A systematic review on artificial intelligence applications in architecture", *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, vol. 4, no. 1, pp. 91–104, 2023. <https://doi.org/10.47818/DRArch.2023.v4i1085>
- [8] C. J. Liang, T. H. Le, Y. Ham, B. R. K. Mantha, M. H. Cheng, and J. J. Lin, "Ethics of artificial intelligence and robotics in the architecture, engineering, and construction industry", *Automation in Construction*, vol. 162, art. no. 105369, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105369>
- [9] Y. Yoshimura, B. Cai, Z. Wang, and C. Ratti, "Deep Learning Architect: Classification for Architectural Design Through the Eye of Artificial Intelligence", in *Proc. CUPUM 2019: Computational Urban Planning and Management for Smart Cities*, Cham, Switzerland, 2019, pp. 249–265.
- [10] S. Ampanavos and A. Malkawi, "Early-Phase Performance-Driven Design Using Generative Models", *Computer-Aided Architectural Design*, vol. 1465, pp. 87–106, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.08572>
- [11] H. Zheng and P. F. Yuan, "A generative architectural and urban design method through artificial neural networks", *Building and Environment*, vol. 205, art. no. 108178, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108178>
- [12] S. Azadi and P. Nourian, "GoDesign: A Modular Generative Design Framework for Mass-customization and Optimization in Architectural Design", in *Proc. 39th eCAADe Conf.*, Novi Sad, Serbia, 2021, pp. 285–294.
- [13] N. S. Vergunova and M. Yu. Blinova, "Trends in the use of artificial intelligence and immersive design in the formation of architectural environment", *Municipal Economy of Cities*, no. 3 (184), pp. 59–64, 2024. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-3-184-59-64>
- [14] Y. Chen, H. Wang, S. Hill, and B. Li, "Consumer attitudes toward AI-generated ads: Appeal types, self-efficacy and AI's social role", *Journal of Business Research*, vol. 185, art. no. 114867, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114867>
- [15] B. Shouman, A. A. E. Othman, and M. Marzouk, "Enhancing users' involvement in architectural design using mobile augmented reality", *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 29, no. 6, pp. 2514–2534, 2022. <https://doi.org/10.1108/ECAM-02-2021-0124>
- [16] J. Rafeiro, A. Tomé, and M. Nazário, "Immersive learning for lost architectural heritage: Interweaving the past and present, physical and digital in the Monastery of Madre de Deus", *Sustainability*, vol. 16, no. 3, art. no. 1156, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16031156>

[17] Collaborating with Municipal Governments on Assessing the Digital Rights Impacts of Their Datafied Technologies. Digital Life Initiative, Cornell Tech. [Online]. Available: <https://dli.tech.cornell.edu/research-projects>. Accessed on: November 1, 2025.

[18] C. Wang, F. Chen, J. Wu, Y. Zhao, H. Lei, J. Liu, and D. Wen, "Progress in mechanism and data processing of visual sensing", *Journal of Image and Graphics*, vol. 25, no. 1, pp. 19-30, 2020. <https://doi.org/10.11834/jig.190404>

[19] Z. Zhang, J. M. Fort, and L. Giménez Mateu, "Exploring the potential of artificial intelligence as a tool for architectural design: A perception study using Gaudí's works", *Buildings*, vol. 13, no. 7, art. no. 1863, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13071863>

[20] Case studies of projects designed using AI-generated solutions. Re-Thinking The Future. [Online]. Available: <https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-community/all1224-case-studies-of-projects-designed-using-ai-generated-solutions/>. Accessed on: October 15, 2025.

[21] A. F. Almaz, E. A. Elsayed, M. H. Abdelfatah, and I. R. Mohamed, "The future role of artificial intelligence design's integration into architectural and interior design education is to improve efficiency, sustainability, and creativity", *Civil Engineering and Architecture*, vol. 12, no. 3, pp. 1749-1772, 2024. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120336>

MODERN APPROACHES TO THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND IMMERSIVE TECHNOLOGIES IN ARCHITECTURE

Vergunova N.,

Candidate of Art Criticism, Associate professor,
natalia.vergunova@kname.edu.ua, ORCID: 0000-0002-8470-7956

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

Abstract. In recent years the integration of artificial intelligence (AI) and immersive technologies, virtual reality (VR) and augmented reality (AR), into architectural and urban design has accelerated. AI, understood as systems performing cognitive tasks, now spans generative conceptualization through performance analytics and optimization. Immersive tools enable richer visualization, at-scale spatial experience, and collaborative refinement, reshaping practice and pedagogy. Despite many publications, holistic syntheses linking methodological integration, ethics, and global practice remain scarce: reviews often isolate technical capabilities or single cases, overlooking interdisciplinary approaches and governance needed for ethical, sustainable outcomes. This study identifies contemporary approaches to applying AI and immersive technologies in shaping the architectural environment. This synthesis identifies several strands: generative methods that produce form and layout options under stated goals and constraints with guided human selection; evaluative and predictive models using machine and deep learning for rapid classification and performance forecasting with immediate feedback; optimization that combines multi-criteria search with simulations of structural behavior, energy performance, and comfort; and hybrid parametric and AI workflows enabling mass individualization. The toolset is shifting toward embedded AI assistants in CAD/BIM that handle repetitive analysis, while VR/AR expand massing, spatial testing, client communication, and remote collaboration. Convergence between AI and spatial interfaces lets parametric and generative methods run directly inside VR/MR with instant feedback. These developments motivate a rethinking of design workflows and robust evaluation methods, strengthening human-centered, data-driven practice and opening new roles within design firms.

Keywords: artificial intelligence, immersive design, virtual reality, augmented reality, architectural design, generative design, CAD/BIM.

Стаття надійшла до редакції 04.11.2025

[This work](#) © 2025 by [Vergunova N.](#) is licensed under [CC BY 4.0](#)