

УДК 721:004.8.004.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2415-8151.2025.38.2.4>

КЛАСИФІКАЦІЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АРХІТЕКТУРІ

Вергунова Наталія Сергіївна

кандидат мистецтвознавства, доцент,
завідувач кафедри дизайну та 3D-моделювання,
Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова, Харків, Україна,
e-mail: natalia.vergunova@kname.edu.ua, orcid: 0000-0002-8470-7956

Анотація. Мета. Метою дослідження є вирішення проблеми непослідовності термінології штучного інтелекту в архітектурі, пропонуючи стислу багатовимірну класифікацію. Визначені чотири виміри застосовуються до ШІ-інструментів у сфері проєктування, будівництва та експлуатації: функціональне та телеологічне призначення, інформація та алгоритмічна техніка, процес та етап життєвого циклу, а також регуляторні, етичні, ресурсні та екологічні чинники.

Методологія. Для досягнення мети використано різноманітні наукові методи. Систематичний огляд літератури – для виявлення первинних досліджень та практичних випадків із використанням чітких критеріїв включення. Метод тематичного кодування дав змогу розкласти зібрані матеріали на зрозумілі теми та виділити повторювані ознаки, що сприяло аналізу й опису застосування інструментів ШІ в архітектурі за призначенням, типом даних і моделей, етапом життєвого циклу та вимогами до безпеки й етики з подальшим включенням до єдиної матриці. Порівняльний аналіз практичних прикладів базується на зіставленні за чотирма вимірами класифікації, що дало змогу виявити типові профілі кожного ШІ-інструменту, визначити його сильні та слабкі боки.

Результати. Визначено чотири основні виміри застосування ШІ в архітектурі: призначення та функціональність системи (наприклад, генеративний дизайн, оптимізація, аналіз, автоматизація); типи даних та алгоритмів (на основі правил або знань проти машинного навчання, включаючи парадигми з наглядом, без нагляду, підкріплення та генеративні); етап інтеграції у життєвий цикл АЕС (від концептуального проєктування та планування до будівництва, експлуатації та виведення з експлуатації); відповідність вимогам безпеки, етики, регулювання та сталого розвитку (вирішення питань зменшення упередженості, пояснюваності, стандартів, енергоефективності). Виявлені дані та ШІ-інструменти (програмне забезпечення для генеративного проєктування, будівельні роботи, системи моніторингу будівель) відображено у класифікації.

Наукова новизна. У дослідженні представлено інтегрований підхід до класифікації, який одночасно враховує технічну та телеологічну систематизацію інструментів ШІ, стадію їхнього життєвого циклу та відповідність етичним, нормативним та екологічним критеріям.

Практична значущість. Результати можуть допомогти архітекторам та розробникам штучного інтелекту структурувати знання про існуючі рішення, впроваджувати принципи сталого використання ШІ в архітектурній практиці.

Ключові слова: архітектура, штучний інтелект, класифікація, таксономія, життєвий цикл, етика, безпека, упередженість, пояснюваний ШІ, сталий розвиток, генеративний дизайн, BIM.

ВСТУП

Штучний інтелект (ШІ) стрімко проникає в архітектурну практику, обіцяючи підсилити креативність, ефективність і сталість в архітектурному проектуванні та будівництві [2; 11]. Останніми роками засоби ШІ застосовуються на всіх фазах архітектури, інженерії та будівництва (Architecture, engineering and construction, AEC) – від генеративного проектування та оптимізації на ранніх етапах планування до роботизованого будівництва й експлуатації «розумних» будівель [4; 9]. Водночас різноманітним застосуванням ШІ в архітектурі бракує єдиної класифікаційної рамки. Дослідники зауважують, що дослідження ШІ в архітектурі фрагментовано на окремі підгалузі, що ускладнює фахівцям досягнення повного масштабу його впливу [11]. Професійна спільнота стикається з викликами щодо розуміння того, як різні інструменти ШІ співвідносяться з проектними завданнями, як інтегрувати їх у робочі процеси та як забезпечити їх відповідальне використання [6; 11].

Попередні дослідження розкривають ШІ в архітектурі з окремих ракурсів. Так, огляди глибокого навчання (Deep learning, DL) в архітектурному проектуванні зосереджуються на даних та інтуїції [7; 20], а дослідження ШІ у будівництві підкреслюють застосування для прогнозування показників ефективності чи управління безпекою [8]. Галузеві звіти так само проголошують трансформаційний потенціал ШІ, проте стримують початковий ажіотаж застереженнями щодо викликів упровадження, управління даними та готовності персоналу [3; 17]. Очевидною є потреба у всеохопній систематизації, здатній класифікувати системи ШІ в архітектурі за кількома вимірами, поєднуючи технічні атрибути з практичною метою [14; 19].

У цій статті розробляється багатовимірна класифікація ШІ в архітектурі для подолання цього розриву. Вона визначає чотири взаємодоповнювальні виміри (класифікації): функціонально-результативний (телеологічний), інформаційно-алгоритмічний, вимір життєвого циклу (процесний) і вимір відповідальності та сталості, створюючи цілісну рамку для систематичного впорядкування наявних інструментів ШІ та для спрямування розроблення й оцінювання нових. Запропонована класифікація допоможе дизайнерам, архітекторам, інженерам та іншим спеціалістам визначати, що покликана робити система ШІ, як вона працює у контексті проектної діяльності, коли/де застосовується у життєвому циклі будівлі та чи відповідає суспільним зобов'язанням щодо безпеки й сталості. Зрештою,

чіткіша класифікація може поліпшити комунікацію між розробниками та кінцевими користувачами «ШІ для архітектури», сприяти найкращим практикам відповідального впровадження та гарантувати, що переваги технології реалізуються без компромісів із професійними й суспільними цінностями [6; 9].

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

ШІ в архітектурному середовищі привернув значну увагу науковців за останні п'ять років: огляди та аналізи проектів (кейсів) зосереджуються на прогнозуванні показників, генеративному проектуванні, автоматизації будівництва, співпраці людини й ШІ та надійності використання ШІ-інструментарію. Бібліометричний огляд Х. Лі (Huimin Li) та ін. (2025) виокремив три домінуючі теми в архітектурі, інженерії та будівництві: прогнозування поведінки матеріалів і енергоспоживання, інтелектуальну оптимізацію для проектування та планування, а також інженерну безпеку й управління ризиками [8].

Е. Віссерс-Сімілон (Elieen Vissers-Similon) та ін. (2025) класифікували підходи: еволюційні алгоритми, графове машинне навчання (Machine Learning, ML) та трансформери для завдань ранніх стадій проектування, визначивши, які методи демонструють найбільший потенціал [19]; це, своєю чергою, підкреслює потребу розрізняти не лише те, що робить інструмент ШІ, а й як він працює, що мотивує виокремлення інформаційно-алгоритмічного виміру (класифікації). У генеративному проектуванні дослідження описують системи, що створюють плани поверхів і цілі будівельні моделі з високорівневих підказок; проекти Університету Texas A&M подають платформу перетворення тексту у 3D-моделі будівель, яка поєднує великі мовні моделі (Large Language Models, LLM) з генеративно-змагальними мережами (Generative Adversarial Network, GAN), прискорюючи розроблення концепцій і розширюючи ітерацію [15].

Дослідження також наголошують на практиці «Людина-в-циклі» (Human-in-the-loop, HITL), акцентованій на поєднанні машинної ефективності з людським судженням, щоб пропозиції ШІ узгоджувалися з архітектурним задумом і проходили експертну оцінку. ШІ розглядається як співтворець або асистент, що надає високорозвинену основу, а не як заміна архітекторів [10]. Це відображає людиноцентричний ШІ, спрямований на підсилення креативності та ухвалення рішень, а не на повну автоматизацію [9; 10]. У будівництві застосування ШІ охоплює робототехніку й автономні системи для

виготовлення, комп'ютерний зір для моніторингу будмайданчика та предиктивну аналітику для оптимізації графіків і вартості; огляд 2022 р. Н. Емамінеджада (Newsha Emaminejad) та Р. Ахавіана (Reza Akhavian) відзначає зростання використання роботів на базі ШІ для мурування та інспекції, водночас надійність і безпека залишаються ключовими чинниками [6].

Довіра ґрунтується на послідовній роботі та надійних відмовобезпечних механізмах; комп'ютерний зір у реальному часі здатний виявляти порушення безпеки, і водночас у публікаціях фіксують зниження інцидентів поряд із занепокоєннями щодо приватності та прийняття з боку персоналу. У цьому сегменті літературних джерел дослідники закликають до рамок «довіреного ШІ», роблять акцент на пояснюваності, надійності та людському нагляді [6], що обґрунтовує вимір відповідальності та сталості, який трактує нормативні стандарти та етичну практику як невід'ємні складники класифікації. Дослідження на етапі експлуатації охоплюють управління «розумними» будівлями та міською інфраструктурою, де ШІ прогнозує енергоспоживання та оптимізує опалення, вентиляцію та кондиціювання повітря (Heating, ventilation, and air conditioning, HVAC) задля сталості [2]. Д. Онатайо (Damilola Onatayo) та ін. (2024) розглядають застосування генеративного ШІ та великих мовних моделей в АЕС, підкреслюючи аналітику післязаселенського етапу (Post-occupancy evaluation, POE), планування технічного обслуговування та потребу в підвищенні кваліфікації фахівців [13].

Глобальне охоплення Європи, Північної Америки та Східної Азії свідчить про широке розуміння важливості теми, водночас висвітлюючи регіональні акценти: європейські дослідження часто надають пріоритет людиноцентричному та етичному ШІ й узгоджуються з ініціативами ЄС, такими як запропонований Регламент ЄС «Про штучний інтелект» (EU AI Act) із жорсткими вимогами до систем високого ризику [9; 12]; натомість США та Азія демонструють швидкий поступ технічних можливостей, зокрема глибокі генеративні моделі для проектування в Китаї [5], а також формуються професійні настанови, наприклад резолюція Американського інституту архітекторів щодо політик використання ШІ [1].

МЕТА

Дослідження усуває фрагментованість термінології ШІ в архітектурі, пропонуючи лаконічну багатовимірну класифікацію, узгоджену з проблемою, окресленою у вступі.

Воно визначає й операціоналізує чотири виміри (класифікації): функціонально-результативний (телеологічний), інформаційно-алгоритмічний, вимір життєвого циклу (процесний) та вимір відповідальності та сталості. Включені у класифікаційну матрицю, ці виміри окреслюють критерії кодування з обов'язковими та додатковими полями, визначають первинні й вторинні ролі ШІ-інструментів, формують їхній профіль відповідальності та сталості і задають рекомендації щодо послідовності дій у «сірих зонах». Для досягнення мети означено такі кроки: синтезувати новітні дослідження для виведення критеріїв і побудувати класифікаційну матрицю із застосуванням до репрезентативних ШІ-інструментів на різних стадіях архітектурного проекту та його реалізації.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Перший вимір класифікує архітектурну систему ШІ за її *функціонально-результативною (телеологічною)* метою, по суті, за тим, для чого систему спроектовано, і на практиці ці цілі групуються у кілька повторюваних категорій. Одна з категорій стосується генеративної чи креативної допомоги в проектуванні, коли системи створюють проектний контент або варіанти, зокрема планувальні схеми, об'ємно-просторові моделі будівель чи фасади за заданих обмежень [10; 15]. Дизайнери-асистенти на основі великих мовних моделей можуть формувати 3D-концепти з текстових описів, а генеративні зображувальні моделі типу DALL-E або Stable Diffusion – візуалізувати концептуальні образи за промптами [5], і все це з телеологічною метою – досліджувати простір рішень і пришвидшувати творчий вибір.

Інша категорія зосереджується на аналітичному та прогностичному оцінюванні, коли ШІ підтримує аналіз, моделювання або прогнозування в архітектурі: оцінює показники ефективності (енергоспоживання, роботу конструкцій, акустику), перевіряє відповідність вимогам (будівельні норми, доступність) або прогнозує результати (вартість, ризику). Прикладами є моделі, що оцінюють міцність на стиск бетонних сумішей або прогнозують енергетичний попит за проектними параметрами [8], надаючи дані для ухвалення рішень часто швидше або точніше, ніж традиційні обчислення чи моделювання самі по собі.

Ще одна категорія охоплює оптимізацію та підтримку прийняття рішень, коли ШІ-інструменти автоматично шукають кращі проектні чи будівельні розв'язки за заданими критеріями; багатокритеріальні методи – від

генетичних алгоритмів до агентів підкріплювального навчання – можуть конфігурувати планувальні схеми або конструктивні системи, врівноважуючи енергоспоживання, вартість і конструктивну ефективність, а оптимізатори графіків будівництва коригують послідовності робіт, щоб зменшити затримки [19], тим самим виокремлюючи оптимальні варіанти серед багатьох можливостей.

Окрема категорія стосується автоматизації рутинних завдань шляхом делегування повторюваних або трудомістких кроків, наприклад автоматизоване креслення чи внесення даних до BIM (Building information modeling), перевірка відповідності нормам на основі ШІ, що сканує моделі на предмет протипожежних порушень, або роботи, які виконують будівельні операції. Системи мурування на базі ШІ демонструють, як підзадача може виконуватися автоматично для підвищення ефективності й зменшення людських помилок, хоча такі застосування також перетинаються з міркуваннями виміру життєвого циклу (процесного).

Нарешті, категорія моніторингу та керування застосовує ШІ до спостереження в реальному часі, зворотного зв'язку та керувальних дій на будмайданчиках і всередині будівель; комп'ютерний зір і потоки даних IoT (Internet of Things) відстежують хід робіт або параметри середовища та ініціюють коригування чи тривоги, наприклад моніторинг безпеки на майданчику, що виявляє відсутність засобів індивідуального захисту або небезпечну близькість і сповіщає менеджерів [6], тоді як оперативне керування у «розумних» будівлях модулює опалення, вентиляцію та кондиціонування повітря (HVAC) залежно від побажань користувача [2].

Ці категорії не є взаємовиключними, адже один застосунок може поєднувати кілька функцій; утім, класифікація виокремлює первинну цільову функцію: наявність чіткої головної мети є обов'язковою, тоді як вторинні ролі необхідно фіксувати. Коли функції справді рівнозначні, пріоритет надається тій меті, що безпосередніше пов'язана з основною ціннісною пропозицією ШІ-інструменту або з результатом, який він передусім забезпечує.

«Сірі зони» виникають, коли система ШІ одночасно оптимізує планувальне рішення на конструктивну надійність і вартість. Межа між категоріями залежить від контексту використання: якщо інструмент вбудовано в інтерфейс дослідження рішень, який показує архітекторам кілька альтернатив, його поведінка узгоджується з генеративним проектуванням; якщо ж він працює як фоновий розв'язувач,

що шукає єдине найкраще рішення, йдеться про оптимізацію. Коли відмінність лишається непевною, практичний тест полягає у з'ясуванні якого первинного результату очікує користувач: різноманітних варіантів дизайну чи одного найбільш оптимального, адже саме ця очікуваність спрямовує класифікацію.

Під «сірими зонами» в розрізі функціонально-результативного виміру можна розуміти випадки, коли ознаки двох категорій ШІ-інструментів (наприклад, генеративне проектування та оптимізація) перекриваються й немає очевидної головної мети. У такому разі доцільною є фіксація обов'язкової первинної функції (за очікуванням основним результатом) і, за потреби, додання вторинної.

Другий вимір характеризує системи ШІ за природою *інформації*, з якою вони працюють, і за *алгоритмами* чи парадигмами навчання, що їх приводять у дію, разом це описує, як система влаштована внутрішньо. Ранні підходи в архітектурі часто спиралися на знаннєві методи: експертні системи з правилами, параметричні скрипти, створені проєктувальниками, онтології чи пошукові процедури, усі вони діяли на основі явних правил і евристик; натомість сучасні підходи переважно є навчально-орієнтованими й виводять закономірності з даних [8].

Експертна система для планувальних рішень може кодувати правила, наприклад розміщення кухні поруч з їдальнею, тоді як модель, заснована на навчанні, може виводити вподобання щодо планувань із планів поверхів. Системи, що переважно спираються на фіксовані правила або вручну сконструйовані пошукові процедури, розглядаються як знаннєві чи правил-орієнтовані підходи ШІ (rule-based), а системи, що залежать від навчальних даних і статистичного моделювання, – як підходи ШІ на основі машинного навчання (ML). Ця відмінність зазвичай узгоджується з різними стратегіями перевірки (валідації) та обмеженнями: методи на правилах залежать від повноти правил, тоді як машинне навчання – від репрезентативності навчальних даних.

У межах навчальних підходів поширеними парадигмами є контрольоване навчання для задач прогнозування, наприклад нейронна мережа, навчена на сотнях енергетичних симуляцій, щоб оцінювати енергоспоживання будівлі за проєктними параметрами [8]. Також слід відзначити неконтрольоване навчання для кластеризації та виявлення аномалій, зокрема групування подібних проєктів або позначення нетипових показників сенсорів без розмітки; навчання

з підкріпленням для послідовних рішень, де ШІ-агент ітеративно (послідовно) коригує проєкт, максимізуючи, наприклад, конструктивну ефективність; а також глибокі генеративні моделі, у тому числі GAN, VAE (Variational Autoencoder) та дифузійні моделі (Diffusion Models), які дедалі частіше застосовують для пропонування нових проєктних опцій, наприклад синтез фасадів на основі GAN або варіації планувань поверхів на основі дифузійних методів [19].

Слід зазначити, що генеративно-змагальна мережа (GAN) належить до класу генеративних моделей, де дві нейромережі навчаються одночасно у «грі нульової суми», що моделює ситуацію, де виграш одного учасника точно дорівнює програшу іншого, тож сума результатів завжди буде рівнятися нулю. Модель варіаційного автоенкодера (VAE) навчається відновлювати дані (плани, фасади тощо) і водночас кодує їх у компактні «сенсові» змінні, з яких можна генерувати нові зразки. VAE відрізняється від GAN більш стабільним навчанням, проте ця модель схильна до «м'яких/розмитих» результатів. Дифузійні моделі – це генеративні моделі, які вчать поетапно видаляти шум із даних, відтворюючи процес їх утворення з чистого шуму назад до реалістичного зразка [19]. Дифузійні підходи закладено в основі моделей Stable Diffusion, Imagen, DALL-E 3, Midjourney та ін.

Ці парадигми різняться вимогами до даних і типами виходів, тож у межах другого виміру класифікації займають окремі підкатегорії. На класифікацію додатково впливають модальності даних (типи/форми вхідної інформації), адже архітектурний ШІ може опрацьовувати зображення (фото ділянки, ескізи), тривимірні подання (CAD, BIM-моделі, хмари точок), тексти (норми, завдання на проєктування) та числові потоки (показники лічильників, кліматична статистика). Зорово-орієнтовані ШІ-системи (наприклад, система комп'ютерного зору для моніторингу безпеки на будмайданчику) зазвичай використовують конволюційні архітектури (Convolutional neural network, CNN), тобто тип нейромереж зі згортками (convolutions), що автоматично «виловлюють» локальні ознаки зображень (контури, текстури, форми) і добре підходять для класифікації та сегментації.

Мовно-орієнтовані ШІ-системи (наприклад, помічник із будівельних норм, що читає тексти, відповідає на запити і пояснює згідно з нормативними документами) використовують трансформери (Transformers) – архітектури нейромереж із механізмом self-attention, які ефективно моделюють довгі текстові

залежності або інші LLM – великі мовні моделі на базі трансформерів, що вмюють узагальнювати знання з великих обсягів тексту, виконувати інструкції, резюмувати і відповідати на питання.

Графово-орієнтовані ШІ-системи, що опрацьовують дані у вигляді графів (вузли+ребра), де кожен вузол агрегує ознаки суміжних і оновлює власний стан, завдяки чому мережа враховує структуру зв'язків, працюють із BIM, CAD [18] чи мережевими поданнями для виявлення колізій і порушень норм у контексті топології, класифікації/сегментації елементів, пошуку критичних шляхів або аномалій у мережах систем.

У межах інформаційно-алгоритмічного виміру складність (обсяг параметрів і глибина моделі) та прозорість (наскільки зрозуміло, чому модель дала певний результат) виступають якісними підкритеріями. За ними можна розрізнити інтерпретовані алгоритми (лінійні моделі і дерева рішень) та «непрозорі» високопотужні мережі, тобто великі нейронні моделі (глибокі CNN, трансформери) з мільйонами параметрів, внутрішню роботу яких важко інтуїтивно відстежити. Це розрізнення не змінює базову парадигму навчання ШІ-інструмента, що, наприклад, належить до контрольованого ML, якщо навчається на розмічених даних, однак напряму пов'язане з пояснюваністю у вимірі відповідальності та сталості. Тому в описі ШІ-системи можуть бути додатково позначені як внутрішньо інтерпретовані або як такі, що потребують методів пояснюваного ШІ (Explainable AI, XAI), що роблять рішення моделей зрозумілими для людини: показують, чому алгоритм дійшов саме такого висновку.

Цей вимір є критичним для розуміння спроможностей і обмежень: наприклад, навчально-орієнтовані системи можуть вимагати великих наборів даних і нести ризик їх упередженості [14], тоді як правило-орієнтовані системи гірше даються до складно вирішуваних завдань, зате їх легше перевіряти (валідувати). Класифікуючи інструмент ШІ за цим інформаційно-алгоритмічним виміром, можна зрозуміти, який тип перевірки та якого роду інтеграція в робочі процеси може знадобитися.

Як приклад «сірої зони» в розрізі інформаційно-алгоритмічному виміру можна навести гібрид, де правило-орієнтований модуль (rule-based) і модель машинного навчання (ML) працюють разом, наприклад інструмент перевіряє норми за заздалегідь прописаними правилами, а випадки на межі передає на класифікацію CNN. Правило-орієнтований підхід

у ШІ-інструменті визначається явними правилами і не вчиться на даних, машинне навчання виводить закономірності з навчальних вибірок і приймає рішення на підставі статистичних моделей. У такому гібриді основне значення надається тому компоненту, що реально визначає вихід під час виконання, якщо фінальне рішення дає модель, інструмент позначають як ML-based, якщо рішення остаточно фіксують правила, інструмент класифікують як Rule-based. Другий складник можна зафіксувати як додатковий, із позначенням, наскільки логіка дії ШІ-інструменту є зрозумілою для людини.

Третій вимір розміщує систему ШІ в межах життєвого циклу (процесний), уточнюючи, коли і де вона працює впродовж розроблення проєкту та подальшої експлуатації будівлі. У широкій перспективі це охоплює планування та концептуальне проєктування, де ШІ підтримує ранній аналіз ділянки і перевірку здійсненності: інструменти компонують об'єми будівлі для оптимізації інсоляції та видів, а сервіси розбирають зонування, пропонуючи варіанти забудови, зокрема платформи типу Autodesk Forma від компанії Autodesk [3].

Цей вимір також включає аспекти детального проєктування та інженерії, де ШІ підсилює розроблення рішень, аналіз і документацію – від структурної оптимізації та CAD/BIM-інтелектуальних помічників, що автодоповнюють рутинне креслення або перевіряють правила проєктування, до інженерних аналізів для конструкцій і ОВК (HVAC), електрики, водопроводу (Mechanical, electrical, and plumbing, MEP). Серед типових випадків можна зазначити перевірку колізій у моделі Revit або пропозиції щодо трасування ОВК [8; 10].

Сюди може бути віднесено будівництво й виготовлення, де робототехніка, оптимізація графіків і ланцюгів постачання та візуальний моніторинг майданчика порівнюють зображення фактичного стану з BIM і відстежують дотримання вимог безпеки. Експлуатація та обслуговування, де системи «розумних» будівель керують енергоспоживанням, забезпечують прогностичне обслуговування й оптимізують комфорт, а в міському масштабі цифрові двійники чи інструменти керування трафіком перетинаються з побудованим середовищем (приклади: прогноз відмов ліфтів або планування ремонту фасадів за даними сенсорів і використання) [2]; а також реконструкція й завершення життєвого циклу, де ШІ підтримує сканування наявних споруд для формування планів реновації та допомагає

у плануванні демонтажу, сортуванні матеріалів і переробленні, часто із застосуванням робототехніки.

Для більшості ШІ-інструментів стадія виміру життєвого циклу (процесного) визначається однозначно, проте коли система охоплює кілька стадій, класифікацію слід прив'язувати до тієї, на яку вона має найбезпосередніший вплив, із додатковою приміткою за потреби, якщо вихідні матеріали спрямовані на пізніші фази (наприклад, проєктні результати у форматі документації для будівництва). Причому «сіра зона» виникає тоді, коли інструмент первинно розгортається на етапі проєктування, але його результати системно використовуються і в експлуатації; у такому разі фіксується первинна стадія застосування з можливістю складеної позначки «Проєктування та експлуатація» (Design & Operations) для збереження порівнюваності. Присвоєння щонайменше однієї стадії є обов'язковим, і на практиці багато застосунків зосереджуються на проєктуванні та будівництві [2]. Такий підхід показує, як внески ШІ відображаються на традиційному робочому процесі, водночас фіксує нерівномірність упровадження: активність концентрується у проєктуванні та будівництві, а впровадження в експлуатації прискорюється разом із поширенням технологій «розумних» будівель [2; 13].

Четвертий вимір – вимір відповідальності та сталості поєднує регуляторно-етичну узгодженість із ресурсно-екологічною результативністю, адже обидва аспекти стосуються того, наскільки ШІ-система відповідає зовнішнім вимогам і цінностям поза суто функціональністю. Це означає те, чи вбудовано в проєктування та експлуатацію безпеку, етику, зменшення упередженості, відповідність стандартам і сталість. З погляду безпеки й надійності увагу зосереджено на дотриманні галузевих норм і стабільній поведінці за очікуваних умов у АЕС, тож генеративні інструменти, що поважають будівельні норми, і системи перевірки норм трактуються як відповідні вимогам, тоді як моніторинг конструктивної цілісності, підтверджений на великих наборах даних із високою точністю виявлення пошкоджень, розглядається як такий, що досягає релевантних порогів надійності [8].

Міркування про упередженість і справедливість стосуються можливих перекосів у даних чи алгоритмах і заходів для їх пом'якшення, аби, наприклад, ШІ-моделі, що працюють із житловою забудовою, не знижували репрезентованість певних культурних стилів, а розміщення в міському середовищі забезпечувало рівне ставлення до районів.

Пояснюваність і прозорість стосуються того, чи можуть користувачі зрозуміти логіку ШІ-системи, наприклад коли інструмент перевірки відповідності будівельним нормам підсвічує конкретне правило, через яке згенеровано зауваження. Підходи, що забезпечують пояснюваність, належать до ХАІ, тоді як моделі з низькою прозорістю залишаються «чорними скриньками». Стандарти й сертифікація передбачають узгодження з рамками врядування, зокрема рамка управління ризиками ШІ від Національного інституту стандартів і технологій США (NIST AI Risk Management Framework, NIST), призначена допомагати організаціям виявляти, оцінювати, зменшувати та моніторити ризики ШІ протягом усього життєвого циклу системи; і виконання зобов'язань за такими інструментами, як Регламент ЄС про ШІ (EU AI Act) [12], особливо для високоризикових застосувань, які мають упроваджувати чітко визначені заходи контролю ризиків.

Ресурсно-екологічний складник у вимірі відповідальності та сталості охоплює прямі внески у сталість, наприклад рекомендації, що зменшують енерговитрати або вуглецевий слід, а також ефективність самої ШІ-моделі, зокрема її енергетичну вартість навчання та обчислення під час використання [10; 21]. Приклади варіюють від добору низьковуглецевих матеріалів до оптимізації денного освітлення, що знижує потребу в штучному світлі [2]. Етичне використання та суспільний вплив охоплюють захист приватності (наприклад, анонімізацію обличч на зображеннях із будмайданчика), вплив на зайнятість, який пом'якшується відповідальним підвищенням кваліфікації, і механізми підзвітності, введення журналів аудиту та людське затвердження для критично важливих рішень. Професійні орієнтири формуються, зокрема, в ініціативах Американського інституту архітекторів (American Institute of Architects, AIA) щодо етики ШІ [1].

У цьому вимірі слід обов'язково зазначати, чи ШІ-інструмент є критичним для виконання вимог безпеки, а також його нормативну класифікацію, зокрема можливе позначення високого ризику за EU AI Act. «Сіримі зонами» можна назвати такі випадки, коли атрибут (окрема ознака профілю ШІ-інструменту) у вимірі відповідальності та сталості не має однозначної відповіді або залежить від контексту використання. Ідеться про ситуації, коли ШІ-інструмент частково відповідає вимогам безпеки, має обмежену пояснюваність, працює з даними сумнівної якості або формально не підпадає під конкретну норму,

але впливає на рішення. У такому разі необхідно зафіксувати стан атрибута з присвоєнням відповідного значення та виявленням кроків для зняття невизначеності. Такий підхід відповідає принципам відповідального впровадження ШІ, коли оцінюється не лише результативність, а й дотримання професійних і суспільних цінностей [14]. Значущість виміру відповідальності та сталості надалі зростатиме з посиленням регулювання та сталого розвитку в архітектурі.

Поєднання чотирьох вимірів утворює всеохопну систематизацію, що представлена у класифікаційній матриці (табл. 1), де кожен вимір слугує окремою ознакою для характеристики інструмента ШІ.

Ці приклади демонструють, як виміри класифікації формують цілісний профіль кожної системи ШІ. Autodesk Forma працює на концептуальній стадії як генеративний інструмент на основі еволюційних алгоритмів із наголосом на чинниках довкілля, тож її класифікація одночасно виявляє інноваційні сильні боки та межі нормативної відповідності: платформа підтримує ранній аналіз сталості, однак фінальні проекти все ще потребують детальної перевірки відповідності будівельним нормам. CEMEX GO ілюструє галузевий інструмент, зосереджений на аналітиці у будівництві, де надійність безпосередньо пов'язана з безпекою. Smartvid.io висуває на перший план етичні аспекти, зокрема приватність, якими необхідно керувати під час розгортання на будмайданчику.

Загалом багатовимірна класифікація дає змогу більш точно зрозуміти, що робить система ШІ, як вона працює, де її місце в робочому процесі та чи відповідає вона необхідним зовнішнім вимогам. Така цілісна класифікація виходить за межі одновимірних систематизацій, що перелічують застосування ШІ лише за функцією або лише за технологією. Вона також урахує, як зазначають В. Плеврис (Vagelis Plevris) і Х. Хосамо (Haidar Hosamo), що успішна інтеграція ШІ в галузі архітектури потребує одночасного врахування технічної результативності та етичного врядування [14].

ВИСНОВКИ

У статті подано багатовимірну класифікацію, узгоджену з окресленою метою, що визначається чотирма вимірами: функціонально-результативним (телеологічним), інформаційно-алгоритмічним, виміром життєвого циклу (процесним) та виміром відповідальності та сталості. Запропонована класифікація фіксує нюанси, які виходять за межі

Таблиця 1.

Багатовимірна класифікаційна матриця інструментів ШІ в архітектурі

ШІ-система (Інструмент)	Функціонально-результативний вимір	Інформаційно-алгоритмічний вимір	Вимір життєвого циклу	Вимір відповідальності та сталості
Autodesk Forma (Autodesk) – ШІ-інструмент планування ділянок	Генеративне проектування та аналітика ділянки; пропозиції варіантів забудови	Модель машинного навчання (ML); мультимодальність (генератор, клімат, обмеження); генерація моделі та її оптимізація	Передпроектні дослідження та концептуальне проектування	Пояснюваність середня; орієнтація на сталість (інсоляція, вітрові впливи); відповідність нормам частково залежить від налаштувань
TestFit – автоматичний генератор плану поверху	Генеративний підбір планувань/типологій; конфігурація квартир і паркінгів	Гібрид: правило-орієнтований модуль (Rule-based) + модель машинного навчання (ML); оптимізація на основі генетичних алгоритмів, тобто пошук кращих рішень за допомогою «еволюції» популяції варіантів	Концепція та стадія ескізів; ранні етапи у дизайні проектного рішення	Пояснюваність середня; упередженість контрольована налаштуваннями; відповідність нормам залежить від локальних правил
BricsCAD BIMIFY (AI) – ШІ-інструмент автокласифікації BIM-елементів і прискорення випуску документації	Автоматизація рутинних кроків і аналітика якості моделі: автокласифікація елементів, підготовка планів/розрізів	Гібрид: правило-орієнтований модуль (Rule-based) + модель машинного навчання (ML); модальність 3D/BIM; автокласифікація, прискорені команди редагування	Основні етапи проектування та підготовка документації	BIMIFY аналізує модель і автоматично призначає типи/поверхи/простори, за потреби створює плани та фасади; пришвидшує випуск документації, потребує узгодження із стандартами
CEMEX GO – платформа для прогнозування характеристик бетону	Аналітика та прогноз показників матеріалу (міцність на тиск тощо)	Модель контрольованого машинного навчання (Supervised ML); числові дані лабораторних випробувань	Проектування конструкцій; виробництво/постачання матеріалів	Пояснюваність середня; застосовується у рішеннях щодо складу сумішей; відповідність стандартам випробувань
Smartvid.io «Vinnie» – безпека будмайданчика	Моніторинг безпеки та оповіщення	Модель конволюційної архітектури (CNN)	Будівництво	Потрібне документування пояснюваності (XAI-звіт) із результатами аналізу важливості ознак, тестами на упередженість і межами застосовності моделі; є відповідним до вимог Адміністрації з охорони праці та здоров'я США (Occupational Safety and Health Administration, OSHA)

загальних ознак, і спирається на сучасні дослідження та практику. Вона може допомогти прояснити, чи є ШІ-система є генеративною або аналітичною, чи спирається на навчання чи на фіксовані правила, на якій стадії застосовується та чи відповідає критеріям безпеки й сталості. Це сприяє більш доцільному добору ШІ-інструментів і виявленню незадоволених потреб, зокрема обмежену кількість інструментів для стадії будівництва з належною пояснюваністю [3; 6].

Завдяки явному включенню четвертого виміру просувається відповідальне впровадження, адже продуктивності недостатньо, і системи мають бути зрозумілими, справедливими та безпечними в контекстах, що впливають на здоров'я, безпеку та добробут суспільства. Виміри лишаються адаптованими

до нових моделей загального призначення та міжстадійних систем. У підсумку ця багатовимірна систематизація надає узгоджений термінологічний апарат і методичний інструментарій, зокрема класифікаційну матрицю, для спрямування інноваційної та відповідальної інтеграції ШІ в архітектурне середовище.

Подальше дослідження доцільно спрямувати на поглиблення кожного з чотирьох вимірів як окремого напрямку, зокрема на уточнення категорій і метрик у функціонально-результативному вимірі, на розроблення показників прозорості та мультимодальної типології – в інформаційно-алгоритмічному, на валідацію стадійної застосовності та переносимості результатів у вимірі життєвого циклу, а також на операціоналізацію профілю відповідальності та сталості через показники

пояснюваності, контроль упередженості й енергоефективності.

ЛІТЕРАТУРА

[1] 2025 annual business meeting addresses AI usage in architecture, fellowship qualifications. *American Institute of Architects*. URL: <https://www.aia.org/article/2025-annual-business-meeting-addresses-ai-usage-architecture-fellowship-qualifications> (дата звернення: 01.10.2025).

[2] Artificial Intelligence as an Ally in Architectural Decarbonization: From Conception to Building Implementation. *ArchDaily*. URL: <https://www.archdaily.com/1011723/artificial-intelligence-as-an-ally-in-architectural-decarbonization-from-conception-to-building-implementation#:~:text=However%2C%20beyond%20AI%27s%20contributions%20to,buildings%E2%80%99%20adaptation%20and%20daily%20operations> (дата звернення: 02.10.2025).

[3] AI hype cycle. *Autodesk*. URL: <https://www.autodesk.com/design-make/research/state-of-design-and-make-2025/ai-hype-cycle> (дата звернення: 05.10.2025).

[4] Bölek B., Tural O., Özbaşaran H. A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*. 2023. Vol. 4. № 1. P. 91–104. DOI: <https://doi.org/10.47818/DRArch.2023.v4i1085>

[5] Chen F., Mai M., Huang X., Li Y. Enhancing the sustainability of AI technology in architectural design: Improving the matching accuracy of Chinese-style buildings. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. № 19. Article 8414. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16198414>.

[6] Emaminejad N., Akhavan R. Trustworthy AI and robotics: Implications for the AEC industry. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 139. Article 104298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104298>

[7] Harapan A., Indriani D., Rizkiya N.F., Azbi R.M. Artificial intelligence in architectural design. *International Journal of Design (INJUDES)*. 2021. Vol. 1. № 1. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.34010/injudes.v1i1.4824>

[8] Li H., Zhang Y., Cao Y., Zhao J., Zhao Z. Applications of artificial intelligence in the AEC industry: A review and future outlook. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2024. Vol. 24. № 3. P. 1672–1688. DOI: <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2343800>.

[9] Li Y., Chen H., Yu P., Yang L. A review of artificial intelligence in enhancing architectural design efficiency. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. № 3. Article 1476. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15031476>.

[10] Meselhy A., Almalkawi A. A review of artificial intelligence methodologies in computational automated generation of high-performance floorplans. *npj Clean Energy*. 2025. Vol. 1. Article 2. DOI: <https://doi.org/10.1038/s44406-025-00002-8>.

[11] Mrosła L., Both P. Quo vadis AI in Architecture? Survey of the current possibilities of AI in the architectural practice. *37 Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe and XXIII Iberoamerican Society of Digital Graphics, Portugal*. 2019. Vol. 7. № 1.

P. 45–54. DOI: https://doi.org/10.5151/proceedings-eaadesigradi2019_302.

[12] Novelli C., Casolari F., Hacker P., Spedicato G., Floridi L. Generative AI in EU law: Liability, privacy, intellectual property, and cybersecurity. *Computer Law & Security Review*. 2024. Vol. 55. Article 106066. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2024.106066>.

[13] Onatayo D., Onososen A., Oyediran A.O., Oyediran H., Arowoia V., Onatayo E. Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling—A review. *Architecture*. 2024. Vol. 4. № 4. P. 877–902. DOI: <https://doi.org/10.3390/architecture4040046>.

[14] Plevris V., Hosamo H. Responsible AI in structural engineering: A framework for ethical use. *Frontiers in Built Environment*. 2025. Vol. 11. Article 1612575. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1612575>.

[15] Renfro, A., & Wells, J. Design smarter: How AI is reshaping architecture. *Texas A&M Stories*. URL: <https://stories.tamu.edu/news/2025/08/27/design-smarter-how-ai-is-reshaping-architecture/> (дата звернення: 01.10.2025).

[16] Sebal, N. Practical AI in AEC: How to start, what to measure, and what to avoid. *aec+tech*: веб-сайт. URL: <https://www.aecplustech.com/blog/practical-ai-in-aec-how-to-start-what-to-measure-and-what-to-avoid> (дата звернення: 03.10.2025).

[17] Topuz B., Çakıcı Alp N. Machine learning in architecture. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 154. Article 105012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105012>.

[18] Vergunova N., Blinova M. CAD/CAM/CAE-systems in design of architectural environment. *Architectural Studies*. 2018. Vol. 4. № 1. P. 111–116.

[19] Vissers-Similon E., Dounas T., De Walsche J. Classification of artificial intelligence techniques for early architectural design stages. *International Journal of Architectural Computing*. 2025. Vol. 23. № 2. P. 387–404. DOI: <https://doi.org/10.1177/14780771241260857>.

[20] Wang A., Dong J., Lee L.-H., Shen J., Hui P. Towards AI-Architecture Liberty: A comprehensive survey on design and generation of virtual architecture by deep learning. *Journal of the Association for Computing Machinery*. 2023. Vol. 37. № 4. Article 111. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.00510>.

[21] Zewe, A. Explained: Generative AI's environmental impact. *MIT News*. URL: <https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117> (дата звернення: 04.10.2025).

REFERENCES

[1] American Institute of Architects (2025, June 5). 2025 annual business meeting addresses AI usage in architecture, fellowship qualifications. Retrieved from: <https://www.aia.org/article/2025-annual-business-meeting-addresses-ai-usage-architecture-fellowship-qualifications> [in English].

[2] ArchDaily. (2024, January 11). Artificial Intelligence as an Ally in Architectural Decarbonization:

From Conception to Building Implementation. Retrieved from: <https://www.archdaily.com/1011723/artificial-intelligence-as-an-ally-in-architectural-decarbonization-from-conception-to-building-implementation#:~:text=However%2C%20beyond%20AI%27s%20contributions%20to,buildings%E2%80%99%20adaptation%20and%20daily%20operations> [in English].

[3] Autodesk. (2025, April). AI hype cycle. Retrieved from: <https://www.autodesk.com/design-make/research/state-of-design-and-make-2025/ai-hype-cycle> [in English].

[4] Bölek, B., Tural, O., & Özbaşaran, H. (2023). A systematic review on artificial intelligence applications in architecture. *Journal of Design for Resilience in Architecture and Planning*, 4(1), 91–104. <https://doi.org/10.47818/DRArch.2023.v4i1085> [in English].

[5] Chen, F., Mai, M., Huang, X., & Li, Y. (2024). Enhancing the sustainability of AI technology in architectural design: Improving the matching accuracy of Chinese-style buildings. *Sustainability*, 16(19), 8414. <https://doi.org/10.3390/su16198414> [in English].

[6] Emaminejad, N., & Akhavan, R. (2022). Trustworthy AI and robotics: Implications for the AEC industry. *Automation in Construction*, 139, Article 104298. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104298> [in English].

[7] Harapan, A., Indriani, D., Rizkiya, N.F., & Azbi, R.M. (2021). Artificial intelligence in architectural design. *International Journal of Design (INJUDES)*, 1, 1–6. <https://doi.org/10.34010/injudes.v1i1.4824> [in English].

[8] Li, H., Zhang, Y., Cao, Y., Zhao, J., & Zhao, Z. (2024). Applications of artificial intelligence in the AEC industry: A review and future outlook. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24(3), 1672–1688. <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2343800> [in English].

[9] Li, Y., Chen, H., Yu, P., & Yang, L. (2025). A review of artificial intelligence in enhancing architectural design efficiency. *Applied Sciences*, 15(3), Article 1476. <https://doi.org/10.3390/app15031476> [in English].

[10] Meselhy, A., & Almalkawi, A. (2025). A review of artificial intelligence methodologies in computational automated generation of high-performance floorplans. *npj Clean Energy*, 1, Article 2. <https://doi.org/10.1038/s44406-025-00002-8> [in English].

[11] Mrosła, L., & Both, P. (2019). Quo vadis AI in Architecture? Survey of the current possibilities of AI in the architectural practice. *37 Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe and XXIII Iberoamerican Society of Digital Graphics, Portugal*,

7(1), 45–54. http://dx.doi.org/10.5151/proceedings-eaadesigradi2019_302 [in English].

[12] Novelli, C., Casolari, F., Hacker, P., Spedicato, G., & Floridi, L. (2024). Generative AI in EU law: Liability, privacy, intellectual property, and cybersecurity. *Computer Law & Security Review*, 55, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2024.106066> [in English].

[13] Onatayo, D., Onososen, A., Oyediran, A. O., Oyediran, H., Arowoia, V., & Onatayo, E. (2024). Generative AI applications in architecture, engineering, and construction: Trends, implications for practice, education & imperatives for upskilling – A review. *Architecture*, 4(4), 877–902. <https://doi.org/10.3390/architecture4040046> [in English].

[14] Plevris, V., & Hosamo, H. (2025). Responsible AI in structural engineering: A framework for ethical use. *Frontiers in Built Environment*, 11, 1612575. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1612575> [in English].

[15] Renfroe, A., & Wells, J. (2025, August 27). Design smarter: How AI is reshaping architecture. Texas A&M Stories. Retrieved from: <https://stories.tamu.edu/news/2025/08/27/design-smarter-how-ai-is-reshaping-architecture/> [in English].

[16] Sebal, N. (2025, August 25). Practical AI in AEC: How to start, what to measure, and what to avoid. aec+tech. Retrieved from: <https://www.aecplustech.com/blog/practical-ai-in-aec-how-to-start-what-to-measure-and-what-to-avoid> [in English].

[17] Topuz, B., & Çakıcı Alp, N. (2023). Machine learning in architecture. *Automation in Construction*, 154, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105012> [in English].

[18] Vergunova, N., & Blinova, M. (2018). CAD/CAM/CAE-systems in design of architectural environment. *Architectural studies*, 4(1), 111–116. [in English].

[19] Vissers-Similon, E., Dounas, T., & De Walsche, J. (2025). Classification of artificial intelligence techniques for early architectural design stages. *International Journal of Architectural Computing*, 23(2), 387–404. <https://doi.org/10.1177/14780771241260857> [in English].

[20] Wang, A., Dong, J., Lee, L.-H., Shen, J., & Hui, P. (2023). Towards AI-Architecture Liberty: A comprehensive survey on design and generation of virtual architecture by deep learning. *Journal of the Association for Computing Machinery*. 37(4), Article 111. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.00510> [in English].

[21] Zewe, A. (2025, January 17). Explained: Generative AI's environmental impact. MIT News. Retrieved from: <https://news.mit.edu/2025/explained-generative-ai-environmental-impact-0117> [in English].

ABSTRACT

Vergunova N. Classification of artificial intelligence tools in architecture

Purpose. The article seeks to address inconsistent AI terminology in architecture by proposing a concise multi axis classification aligned with the title and the stated problem. Four axes are defined and applied to tools across design, construction, and operations: functional and teleological purpose, information and algorithmic technique, process and lifecycle stage, and regulatory, ethical, resource and ecological factors.

Methodology. A range of scientific methods was used to achieve the aim. A systematic literature review identified primary studies and practical cases under explicit inclusion criteria. Thematic coding organised the collected materials into clear themes and recurrent attributes, enabling analysis and description of AI tools in architecture by purpose, data and model type, lifecycle stage, and safety and ethics requirements, followed by integration into a unified matrix. Comparative analysis of practical examples, aligned with the four classification axes, revealed typical profiles for each tool and identified their strengths and weaknesses.

Results. Four key axes of AI in architecture are identified: system purpose and functionality (e.g., generative design, optimization, analysis, automation); data and algorithm types (rule-based or knowledge-driven vs. machine learning, including supervised, unsupervised, reinforcement, and generative paradigms); integration stage in the AEC lifecycle (from conceptual design and planning through construction, operation, and decommissioning); compliance with safety, ethical, regulatory, and sustainability requirements (addressing bias mitigation, explainability, standards, energy efficiency). Identified data and illustrative tools (generative design software, construction robots, building monitoring systems) are mapped to the taxonomy.

Scientific novelty. The study introduces an integrative classification approach that simultaneously accounts for the technical and teleological taxonomy of AI tools, their lifecycle deployment stage, and conformance to ethical, regulatory, and ecological criteria.

Practical relevance. The results can help architects and AI developers to structure knowledge of existing solutions, implement principles of sustainable AI use in architectural practice.

Keywords: architecture, artificial intelligence, classification, taxonomy, lifecycle, ethics, safety, bias, explainable AI, sustainability, generative design, BIM.

AUTHOR'S NOTE:

Vergunova Nataliia, Candidate of Art History, Associate Professor, Head of the Design and 3D-modeling Department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, e-mail: natalia.vergunova@kname.edu.ua, orcid: 0000-0002-8470-7956.

Стаття подана до редакції: 14.10.2025.

Стаття прийнята до опублікування: 04.11.2025.

Стаття опублікована: 20.11.2025.